

Aus dem Institut für Pflanzenernährung
der Justus Liebig-Universität zu Gießen
Direktor: Professor Dr. phil. Hans Linser

**Modellversuche zur Auswaschung und
Verlagerung von Stickstoff, Phosphat und
Kalium bei vier Böden**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
beim Fachbereich Ernährungswissenschaften
der Justus Liebig-Universität zu Gießen

eingereicht von
Metin Tamci
Dipl. agr. Ing.
aus Seferihisar/Izmir/Türkei

Gießen, im Oktober 1971

Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus dem Institut für Pflanzenernährung
der Justus Liebig-Universität zu Gießen
Direktor: Professor Dr. phil. Hans Linser

**Modellversuche zur Auswaschung und
Verlagerung von Stickstoff, Phosphat und
Kalium bei vier Böden**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
beim Fachbereich Ernährungswissenschaften
der Justus Liebig-Universität zu Gießen

eingereicht von
Metin Tamci
Dipl. agr. Ing.
aus Seferihisar/Izmir/Türkei

Gießen, im Oktober 1971



Dekan: Prof. Dr. H. Linser
1. Berichterstatter: Prof. Dr. H. Linser
2. Berichterstatter: Prof. Dr. N. Atanasiu

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Oktober 1971

Meiner Frau
und meiner Tochter

Inhaltsverzeichnis

	Seite
A. Einleitung und Fragestellung	6
I. Literaturüberblick	8
1. Auswaschung von Stickstoff	8
a. allgemeines	8
b. Nitrifikation	9
c. Bodenart und Bodenstruktur	11
d. Witterung	12
2. Phosphatauswaschung	14
3. Kaliumauswaschung	18
B. Erster Hauptteil	21
I. Eigene Untersuchungen	21
1. Material und Methodik	21
2. Analysenmethoden	24
a. Stickstoffbestimmung	24
b. Kalium- und Phosphorsäure- bestimmung (DL-Methode)	25
II. Ergebnisse der Sickerwasser-Unter- suchung	26
1. Auswaschung von Nitratstickstoff	26
a. Versuchsergebnisse und Diskussion	27
b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse	39
2. Auswaschung von Ammoniumstickstoff	40
a. Versuchsergebnisse und Diskussion	40
b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse	48
3. Auswaschung von Phosphorsäure	49
a. Versuchsergebnisse und Diskussion	49
b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse	56
4. Auswaschung von Kalium	57
a. Versuchsergebnisse und Diskussion	57
b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse	66

	Seite
C. Zweiter Hauptteil	
I. Verlagerung des Stickstoffs	67
II. Literaturüberblick	68
III. Eigene Untersuchungen	72
1. Methodik	72
2. Verteilung bzw. Verlagerung von Nitratstickstoff	73
a. Versuchsergebnisse und Diskussion	73
b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse	86
3. Verteilung bzw. Verlagerung von Ammoniumstickstoff	87
a. Versuchsergebnisse und Diskussion	87
b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse	98
4. Verteilung bzw. Verlagerung von Phosphorsäure	100
a. Versuchsergebnisse und Diskussion	100
b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse	111
5. Verteilung bzw. Verlagerung von Kalium	112
a. Versuchsergebnisse und Diskussion	112
b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse	123
D. Zusammenfassender Diskussion	124
E. Zusammenfassung	141
F. Literaturverzeichnis	147

A. EINLEITUNG und FRAGESTELLUNG

Da in humiden Gebieten im allgemeinen mehr Wasser in den Boden gelangt als durch Verdunstung und Verbrauch durch die Pflanzen verloren geht, kommt es nach Auffüllung der Wasserkapazität des Bodens zu einer abwärts gerichteten Wasserbewegung, die das Sickerwasser ausmacht. Diese Wasserbewegung erfolgt meistens in vertikaler Richtung. Eine horizontale bzw. schräge Wasserbewegung ist jedoch nicht auszuschließen.

Wir führen dem Boden die Pflanzennährstoffe entweder in anorganischer (Mineral-) oder in organischer Form zu. Diese oder hieraus entstehende Ab- und Aufbau- produkte organischen und anorganischen Charakters können, der Bewegung des Sickerwassers folgend, in tiefere Zonen verlagert bzw. ausgewaschen werden, wo sie für die Pflanzenwurzel nicht mehr erreichbar sind. In diesem Falle spricht man von Auswaschungsverlusten; sie können unter extremen Bedingungen erheblich sein.

Eine Reihe von Faktoren sind für die Größe der Auswaschung und Verlagerung der Nährstoffe verantwortlich.

Die Austauschkapazität eines Bodens sowie die Zusammensetzung der Bodenlösung beeinflussen die Verlagerung der Nährstoffe. Aus dem Gehalt an Ton und Schluff kann man überdies auf die Sorptionskraft des Bodens schließen. Daraus kann man Hinweise über die Ionenwanderung in dem betreffenden Boden erhalten. Diese Kriterien reichen jedoch für einen quantitativen Vergleich nicht aus. Für eine exakte Beurteilung der Wanderungsfähigkeit und der Wanderungsgeschwindigkeit sowie deren Ausmaß ist es erforderlich, Bodensäulen zu verwenden. Sie sind je nach Zweck von unterschiedlicher Länge und Durchmesser; auch Lysimeteranlagen

kann man als Bodensäulen ansehen. Sie bestehen oft aus kleinen Parzellen in Kästen (aus Beton oder Kunststoff) und sind zumeist 1 - 2 m tief.

In neuerer Zeit finden auch Radioisotope bei Auswaschungsversuchen Verwendung. In den meisten Fällen werden solche Versuche mit markierten Nährstoffen im Laboratorium an Bodensäulen durchgeführt; unter Einhaltung von Sicherheitsfaktoren lassen sich solche Versuche aber auch im Freiland durchführen (SUSS, 1962).

Die Auswaschung einzelner Nährstoffe wurde bereits in zahlreichen Arbeiten behandelt. So untersuchten RIBLE und DAVIS (1955) den Austausch von Ca durch Mg und Na und verfolgten die Wanderung der betreffenden Ionen in Bodensäulen. BEWER und Mitarbeiter (1957) befaßten sich mit der Dynamik der Austauschvorgänge zwischen Ca , Mg und Na . BATES und TISDALE (1958) verfolgten die NO_3 -Wanderung in Säulen und fanden zwischen Porenvolumen der Böden und der NO_3 -Verlagerung Zusammenhänge.

LINSEER und Mitarbeiter (1959) bestimmten Nitrat- und Ammoniumionen in Bodensäulen und fanden Gesetzmäßigkeiten, mit denen die Wanderungsgeschwindigkeit von Ionen in Böden errechnet werden kann.

Über die gegenseitige Beeinflussung der Nährstoffe liegen in der Literatur kaum Angaben vor, obwohl die Auswaschung einzelner Nährstoffe bereits in zahlreichen Arbeiten behandelt wurde. Die zunehmende Anwendung der Mehrnährstoffdünger macht es erforderlich, neben dem Verhalten einzelner Nährstoffe auch ihre gegenseitige Beeinflussung zu untersuchen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Verlagerung und Auswaschung von Stickstoff, Phosphat und Kalium aus Düngesalzen sowie die gegenseitige Beeinflussung

dieser Nährstoffe untersucht. Ferner wurde der Einfluß der Bodenreaktion verfolgt. Hierzu wurde ein saurer Boden aufgekalkt, um somit die ermittelten Werte in Hinblick auf pH-Einfluß untereinander vergleichen zu können. Eine Aussage über die gegenseitige Beeinflussung der genannten Nährstoffe bei Verlagerung und Auswaschung ist für die Praxis der Düngung interessant.

I. LITERATURÜBERBLICK

AUSWASCHUNG

Es wird dann von einer Auswaschung gesprochen, wenn die Nährstoffe, die mit dem Sickerwasser in die tieferen Schichten gelangen, nicht mehr von den Pflanzen aufgenommen werden können. Die Größe der Auswaschung wird zumeist in kg Nährstoff/ha/Jahr angegeben. Sie ist abhängig von den klimatischen Gegebenheiten (Niederschlag nach Menge und Dichte, Temperatur und Verdunstung) und von den Bodenverhältnissen (Durchlässigkeit, Textur, Nährstoffvorrat).

Starken Einfluß übt die Pflanze aus mit ihrer jeweiligen Vegetationsdauer und mit ihren Wasser- und Nährstoffansprüchen. Nährstoffzufuhr aus Düngemitteln, chemisches und biologisches Festlegungsvermögen sowie Ionensorptionskapazität des Bodens und Tiefe des durchwurzelten Bodenraumes sind weitere die Auswaschung beeinflussende Faktoren.

1. Auswaschung von Stickstoff

1. a. Allgemeines

In den meisten mineralischen N-haltigen Düngemitteln liegt der Stickstoff in voll wasserlöslicher Form vor. Auch die meisten Ammoniumsalze haben eine hohe Wasserlöslichkeit. Sie zeigen mit ansteigender Temperatur steigende Löslichkeit im Wasser.

Die N-Form spielt bei der Auswaschung eine wichtige Rolle. Während Ammoniakstickstoff im allgemeinen nur in kleineren Mengen ausgewaschen wird (JACOB und WIEGAND, 1952; HUPPERT und BUCHNER, 1953; PFAFF, 1963; LINSER, 1966; SOUKUP, 1968), unterliegt der Nitratstickstoff (HUPPERT und BUCHNER, 1953; BAUMANN und MAAB, 1957; LINSER und Mitarbeiter, 1959; GLIEMEROTH, 1959 b; PFAFF, 1963; VÖMEL, 1966) in hohem Maße der Auswaschung.

Obwohl die Auswaschungsverluste an Ammoniakstickstoff meistens gering sind, kommt es nach GLIEMEROTH (1959a), abgesehen von Ausnahmefällen, nicht zu einer Ammoniak-anreicherung des Bodens, da Ammoniakstickstoff durch Bodenbakterien nitrifiziert und in die Nitrat-Form umgewandelt wird. Das gilt auch für stickstoffhaltige organische Substanzen pflanzlicher und tierischer Herkunft, bei deren Abbau durch Bodenbakterien Ammoniumverbindungen entstehen, die ebenfalls der Nitrifikation unterliegen.

1. b. Nitrifikation

Unter günstigen Bedingungen können die ammoniakhaltigen Düngemittel vollständig nitrifiziert werden, und zwar nach CLAAS (1941) in 24 Tagen, nach JACOB und WIEGAND (1952) in 3-4 Wochen. Dieser Vorgang kann bei ungünstigen Bedingungen allerdings auch mehrere Monate dauern (LARSEN und KOHNKE, 1946). Die Nitrifikationsstärke schwankt von Boden zu Boden und ist sehr unterschiedlich (FREDERICK und DUMENIL, 1956). Diese Autoren weisen besonders auf den Einfluß des pH-Wertes und der organischen Substanz im Boden hin; Diese Faktoren sind jedoch nicht allein für das Ausmaß der Nitrifikation verantwortlich.

Die Bakterien, ohne die keine Nitrifikation stattfinden kann, brauchen Nährstoffe ebenso wie die höhe-

ren Pflanzen. Das Vorhandensein von Ammoniakstickstoff ist für die Nitrifikanten unentbehrlich (ZÖTTL, 1968). RATHSACK (1939) weist auf den Einfluß der Höhe der N-Düngung auf die Nitrifikationsrate hin. Die Toxizitätsgrenze wird mit 3400 kg/ha Ammoniak-N angegeben. Ihre zur Reduktion des CO_2 notwendige Energie erhalten die Bakterien durch Oxydation anorganischer Verbindungen, z.B. NH_3 zu NO_2 (Nitrosomonas) oder NO_2 zu NO_3 (Nitrobacter) (PAGEL, 1967).

Die Träger der Bodenbakterien im Boden sind nach BURRICHTER (1953) feine Humusteilchen sowie schluffige und tonige Bestandteile kolloidalen Charakters.

Wasser- und Luftgehalt eines Bodens beeinflussen sich gegenseitig. Günstige Verhältnisse für Bakterien im Boden liegen dann vor, wenn der Wassergehalt 40 bis 60 % der maximalen Wasserkapazität ausmacht (HUPPERT und BUCHNER, 1953). Schlechte Durchlüftung (HULPOI und Mitarbeiter, 1966 b), sei sie veranlaßt durch hohe Feuchtigkeit oder durch mangelnde Zirkulation, führt stets, wie dies von SALLINGER und HWANG (1938) beobachtet wurde, zu einer Anhäufung von Ammoniak. Außerdem verursacht Trocknung eine Abnahme der Bakterienzahl und damit eine gehemmte Nitrifikation (BURRICHTER, 1953). Für Mineralisierungsvorgänge und Nitrifikation spielt die Bodentemperatur eine wesentliche Rolle. Temperaturwechsel von biologisch ungünstiger Temperatur (0°) zu biologisch günstigeren Temperaturen (25° und 35°) ergab ein Ansteigen des pH-Wertes und vorübergehend des Ammoniaks. Die Optimaltemperatur wird mit 29° angegeben (HULPOI und Mitarbeiter, 1966 a). Aber auch bei wenig unter dem Gefrierpunkt liegenden Temperaturen können Mineralisierung und Nitrifikation in sehr beschränktem Umfang ablaufen.

Die Bakterien stellen an die Bodenreaktion bestimmte Forderungen; allgemein werden sie bei neutraler bis schwach alkalischer Reaktion gefördert. Bei Bodenatmungsversuchen zeigen sie eine geringe Tätigkeit vor allem im saueren Boden. Die höchste CO_2 -Menge wird gebildet in gekalkten und physiologisch alkalisch gedüngten Böden, wie dies eingehend von KLAUB (1940) studiert wurde.

1. c. Bodenart und Bodenstruktur

Das Sorptionsvermögen der Böden für Kationen ist im allgemeinen höher als das für Anionen. KARIM und ISLAM (1956) konnten allerdings eine beträchtliche Austauschkapazität auch für Anionen an ostbengalischen Schluffböden nachweisen. Tonböden zeigen auf Grund ihrer höheren Sorptionskapazität geringere Auswaschungsverluste an Kationen als es bei Sandböden der Fall ist (PFAFF, 1939, 1963; VÖMEL, 1966). Die Auswaschungsverluste werden um so größer, je leichter und humusärmer der Boden ist.

MC DOWELL und SMITH (1958) kommen bei ihren Versuchen zu dem Ergebnis, daß auf schweren Böden in Normaljahren nur geringe oder keine N-Verluste zu befürchten sind, wenn alle ackerbaulichen Maßnahmen getroffen wurden. Nach GLIMEROTH (1959 a) wird die Stickstoffauswaschung häufig überschätzt. Sie ist einmal abhängig vom Gesamt-N-Vorrat und von dem Anteil, der durch Mineralisierungsvorgänge in Abhängigkeit vom pH löslich wird (ZÖTTL, 1968). Aus sauren Böden wird meistens weniger N ausgewaschen als aus alkalischen.

Bei der N-Auswaschung kommt auch den Wasserverhältnissen eine wichtige Bedeutung zu. So müssen wir zwischen dem Haftwasser, das vom Boden festgehalten wird und dem Sickerwasser, dem nicht mehr haften bleibenden Wasser, unterscheiden. Beim Haftwasser unterscheidet man Schwarmwasser und Kapillarwasser. Schwarm-

wasser befindet sich in Hohlräumen von weniger als 3 U, Kapillarwasser in Hohlräumen bis zu 30 U Durchmesser. Schwarmwasser ist nach SEKERA (1938) sehr wenig beweglich und für die Pflanzen nicht nutzbar, während Kapillarwasser normal beweglich ist und für den Wasserhaushalt der Pflanzen die Hauptrolle spielt. Sickerwasser ist leicht beweglich und befindet sich in den Hohlräumen über 30 U Durchmesser.

Nach TEPE und DARLOWSKY (1969) wird die Bewegung des Wassers von vier Hauptkräften beeinflusst, und zwar von Adhäsion zur festen Phase, Oberflächenspannung zur gasförmigen Phase, Kohäsion im Inneren der flüssigen Phase und der Schwerkraft.

Das Wasser bewegt sich vorwiegend vertikal abwärts. Wie BLUME und Mitarbeiter (1968) feststellten, kann die Wasserbewegung erst dann gelegentlich auch seitlich erfolgen, wenn ein Boden nahezu wassergesättigt ist. Nicht nur Textur, sondern auch Porenvolumen eines Bodens beeinflussen die Stickstoffauswaschung. BATES und TISDALE (1958) führten mit grob-texturierter Böden in Säulen Versuche zur Frage der Stickstoffauswaschung durch. Sie stellten bei Böden gleicher Textur unterschiedliche Nitrat-Bewegung fest und kamen zu dem Schluß, daß die Nitrat-Bewegung um so stärker war, je mehr große Poren der Boden enthielt und je mehr Wasser zugeführt wurde.

1. d. Witterung

In Europa üben die Witterungsverhältnisse einen wesentlichen Einfluß auf die Stickstoffauswaschung aus. Daran haben Niederschlag einerseits und Verdunstung andererseits einen variierenden Anteil.

Beim Niederschlag kommt es nicht nur auf die Menge, sondern auch auf die Regendichte, also Regenmenge pro Stunde, an (BAUMANN und MAB, 1957).

Unter Verdunstung versteht man die Summe aus der produktiven (der Transpiration der Pflanzen) und unproduktiven (der direkten) Verdunstung des Wassers von der Erdoberfläche (ATANASIU, 1970). Die Größe der Verdunstung ist u.a. abhängig von der Bodenfarbe, von der Vegetation und von der Neigung des Geländes.

Im Sommerhalbjahr kommt zum Wasser- und Nährstoffverbrauch durch die Pflanzen, im Vergleich zum Winter, noch ein Wasserverlust des Bodens durch Verdunstung hinzu. So versickert trotz größerer Niederschlagsmengen im Sommer weniger Wasser in den Untergrund als im niederschlagsärmeren Winter. Dementsprechend fällt auch die Stickstoffauswaschung überwiegend in den Winter. Daß die N-Auswaschung von der Witterung sehr abhängig ist, zeigt die nachstehende Tabelle von PFAFF (1963) :

Tabelle 1

N-Auswaschung in verschiedenen feuchten Winter- und Sommerhalbjahren (PFAFF, 1963).

(g/m² N-Auswaschung)

Anzahl der Vers. Niederschlag		N-Auswaschung	
		Winterhalbj.	Sommerhalbj.
5	niedrig	1.1	0.1
7	mittel	1.6	0.7
3	hoch	4.6	1.4

Wie aus der Tabelle hervorgeht, bedingt die Jahreswitterung große Unterschiede in den Auswaschungsverlusten.

Niederschläge führen dem Boden aber auch Stickstoff zu. Darüber liegen in der Literatur zahlreiche Untersuchungen vor. Nach Untersuchungen von GERLACH (1926) betrug die N-Zufuhr durch die Niederschläge im Durchschnitt von 11 Jahren 14 kg/ha/Jahr. N. SCHARRER und FAST (1951) stellten in Gießen eine N-Zufuhr durch

die Niederschläge fest, die zwischen 0,003 und 3,9 mg Gesamtstickstoff je Liter schwankte (0,2-24 kg/ha N). PFAFF (1963) konnte eine N-Zufuhr von 10 kg N/ha/Jahr nachweisen. Nach OTTERMANN (1965) werden im Durchschnitt der Jahre mit dem Regen 4,8 kg $\text{NH}_4\text{-N}$ und 2,9 kg $\text{NO}_3\text{-N}$ dem Boden zugeführt.

Die meisten Autoren sind der Meinung, daß bei einer Bilanzaufstellung die N-Zufuhr durch die Niederschläge berücksichtigt werden muß, da sie auf die Versorgung der Pflanzen einen Einfluß nehmen kann.

2. Phosphatauswaschung

Etwa 0,12 % der Erdkruste, so MITRA (1957), besteht aus Phosphor. Mit einer großen Anzahl von Metallen geht der Phosphor komplexe Verbindungen ein. Er liegt jedoch hauptsächlich in Form von Fluorapatit und Hydroxylapatit vor. Das Ca kann in den Apatiten teilweise durch Spurenelemente ersetzt werden. Diese Verbindungen sind für die Pflanzenernährung von Bedeutung.

Obwohl die Höhe der Phosphatauswaschung je nach Bodenart und Bodenstruktur schwankt, nimmt die Phosphorsäure mit ihrer geringen Beweglichkeit eine Sonderstellung ein. Während die Ca-Salze der meisten Säuren wasserlöslich sind, zeigen die im Boden normalerweise vorkommenden Ca-Phosphate eine geringe Wasserlöslichkeit. Das gleiche gilt für die Fe- und Al-Phosphate.

Bei Böden mit hohem Gehalt an sorbierenden Tonkomplexen treten geringere P_2O_5 -Auswaschungsverluste auf als bei Sandböden. GERLACH (1910) untersuchte die Dränagewasser von verschiedenen Gütern zu verschiedenen Zeiten und konnte darin keine P_2O_5 -Auswaschung nachweisen. Auch bei späteren Untersuchungen fand er keine Phosphorsäure im Sickerwasser, obwohl die

Sickerwassermenge je nach Bodenart 121 bis 469 mm betrug. WILHELMIJ (1932) beobachtete auf einem alkalischen lehmigen Sandboden bei einer Niederschlagsmenge von 1047 mm eine P_2O_5 -Wanderung in 30 cm hohen Bodensäulen und stellte eine Auswaschung von 28,3 % der Düngerphosphorsäure bei Thomasphosphat II fest, während diese bei Thomasphosphat I 11,5 %, bei Superphosphat 13,2 % und Rhenaniaphosphat 17,3 % betrug. GISIGER (1933) ermittelte bei Versuchen mit Lysimetergefäßen, im Durchschnitt von 9 Gefäßen, eine Auswaschung im ersten Jahr von 2,9 kg/ha P_2O_5 , im zweiten Jahr 1,1 kg und im dritten Jahr nur Spuren von Phosphorsäure.

Bei vier Böden mit unterschiedlicher Reaktion und Textur fand SCHMITT (1933) Auswaschungsverluste an P_2O_5 zwischen 0,15 und 0,81 kg/ha. FAST (1951) konnte im Sickerwasser aus einer 2 m Bodenschicht eine P_2O_5 -Auswaschung von 0,2 - 1,6 kg nachweisen. HETTERSCHIJ (nach SCHARRER und KÜHN, 1952) stellte auf sehr leichtem Sandboden nach Düngung mit Superphosphat eine Auswaschung der Düngerphosphorsäure in Höhe von 15 - 30 kg/ha und Jahr fest, die durch die Dränagewasser verloren geht.

SCHARRER und KÜHN (1952) fanden Zusammenhänge zwischen Phosphatform, Bodenreaktion und Stallmistdüngung und gaben die Auswaschungsverluste mit 0,16-0,92 kg/ha und Jahr an. SCHARRER (1936) konnte im Sickerwasser keine wägbaren Phosphorsäuremengen ermitteln.

KÖHNLEIN und KNAUER (1958) ermittelten Auswaschungsverluste aus der Krume auf Braunerdelehm bei starker Kalkung in Höhe von 810 g/ha und 510 g/ha an P_2O_5 , während diese bei fehlender Kalkung 1,1 kg/ha, bzw. 1,05 kg/ha P_2O_5 betrugen. PFAFF (1963) konnte im Sickerwasser um so höhere P_2O_5 -Konzentrationen nach-

weisen, je größer die jährliche Sickerwassermenge war und umgekehrt. Er fand dagegen keine Beziehung zwischen Bodenreaktion und Phosphorsäureauswaschung, ebenso zeigte sich die Höhe der P_2O_5 -Auswaschung unabhängig von der Kalkdüngung. VÖMEL (1965) konnte bei Lysimeterversuchen unter 1 m Tiefe keine Phosphorsäureauswaschung nachweisen. Sie stellte jedoch bei Kleinlysimeterversuchen (30 cm Tiefe) eine geringe P_2O_5 -Auswaschung fest (noch nicht veröffentlicht).

Niederschläge führen dem Boden auch eine gewisse Menge Phosphorsäure zu. Die Untersuchungen von SCHARRER und FAST (1951) in Niederschlägen ergaben 0,11-0,39 mg P_2O_5 je Liter, was einem Gehalt von durchschnittlich 1,1 kg je ha und Jahr gleichkommt. GERICKE und KURMIES (1957) fanden einen P_2O_5 -Gehalt von 0,058 mg je Liter. Nach OTTERMAN (1965) betrug die Zufuhr durch die Niederschläge in Dahlem 0,3 kg/ P_2O_5 /ha/Jahr. Die Zufuhr der Phosphorsäure durch die Niederschläge hat somit für die Nährstoffversorgung der Pflanzen keine allzu große Bedeutung.

Die Form des P-Düngers kann auf die P_2O_5 -Auswaschung einen Einfluß ausüben. So erhöhte Superphosphatdüngung die P_2O_5 -Auswaschung auf einem alkalischen Sandboden (PFAFF, 1963). Ähnliche Beobachtungen machte OZANNA (1961). Auf einem alkalischen Sandboden erhöhte die Düngung mit Natronsalpeter im Vergleich mit schwefelsaurem Ammoniak die P_2O_5 -Auswaschung (PFAFF, 1969). Die Ursache hierfür sieht er in der Bildung von Natriumphosphat und in einer Schutzkolloidwirkung von Natriumhumat.

Die Konzentration der Nährstoffe im Sickerwasser sinkt im allgemeinen mit zunehmender Sickerwassermenge, was mit einem Verdünnungseffekt zu erklären ist. Im Gegensatz dazu steigt aber die Phosphatsäurekonzentration mit zunehmender Niederschlagsmenge an.

Die gleiche Beobachtung haben EHRENBURG (1951), MATTSON und Mitarbeiter (1950) und PFAFF (1963) gemacht. Die Erscheinung ist nach Ansicht von MATTSON und Mitarbeitern in der Donnan-Verteilung der Ionen und in der Verdünnung der Bodenelektrolyte zu sehen. Künstliche Beregnung erhöht ebenfalls die Sickerwassermenge und auf Sandböden auch seinen P_2O_5 -Gehalt.

Pflanzen haben nach PFAFF (1963) keinen spezifischen Einfluß auf die P_2O_5 -Auswaschung. Dagegen konnte SÜSS (1962), der mit markierten Superphosphat die P_2O_5 -Wanderung verfolgte, auf dem Boden Brandhof mit verschiedenen Kulturen eine unterschiedliche Adsorption der Phosphorsäure ermitteln. Bei Zuckerrüben wurden in den obersten 5 cm 92,4 %, bei Sommergerste 85,5 % und bei Winterweizen 83,2 % der im Boden vorhandenen markierten Phosphorsäure festgestellt. Als Ursache hierfür wird eine unterschiedliche Ausbildung des Wurzelnetzes angesehen.

3. Kaliumauswaschung

Kaliumsalze sind leicht wasserlöslich. Die Lösegeschwindigkeit einiger K-Salze, wie Langbeinit und Syngenit, ist zwar klein, die Löslichkeit ist jedoch groß. Ihre Löslichkeit hängt von der Bodenfeuchtigkeit und der Korngröße des verabreichten Düngemittels ab.

Das zum Boden zugeführte Kalium reagiert mit den Bodenkolloiden in Austauschvorgängen, wobei es an die Stelle von Ca, Mg und Na tritt.

Die Auswaschung des sich im Boden befindlichen Kaliums wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst.

Bei ton- und humushaltigen Böden ist die K-Auswaschung infolge der hohen Adsorptionsfähigkeit des Bodens und des Humus sehr gering. Dagegen ist sie bei Sandböden höher, da die Fähigkeit dieser Böden, das Kalium zu adsorbieren, geringer ist.

Die Kaliumauswaschung betrug bei den langjährigen Versuchen von PFAFF (1963) auf verschiedenen Böden ohne mineralische Düngung 16 - 23 kg K_2O /ha, bei Düngung mit kaliumhaltigen Düngemitteln und mit Stallmist 22 - 72 kg K_2O /ha. Versuche von KÖHNLEIN (1958) ergaben eine Kaliumauswaschung auf Heidepodsolboden von 5 kg K_2O /ha. Die Kaliumauswaschungswerte liegen nach Untersuchungen von VÖMEL (1965) ebenfalls ziemlich niedrig. Sie betrugen auf schweren Böden (Löß- und Lehm Boden) 6 - 7 kg/ha, während sie auf Sandboden mit 13 kg/ha und Jahr wesentlich höher waren.

Obwohl die Kaliumentzüge durch die Pflanzen sehr unterschiedlich sind, wird die Kaliumauswaschung davon kaum beeinflusst (PFAFF, 1949; JUNG und DRESSEL, 1969).

JUNG und DRESSEL (1969) haben den Einfluß der Kaliumdüngung auf die K-Auswaschung untersucht. Sie

konnten nachweisen, daß die Auswaschungsmengen an Kalium beim Lehm Boden ohne Kaliumdüngung genauso hoch waren wie bei den K-Düngungsvarianten. Die Verfasser weisen ferner darauf hin, daß die unterschiedliche Ausbringungstermine der Düngung beim Lehm Boden ebenfalls keinen Einfluß hatten. Nur auf Sandboden verstärkte Kaliumdüngung die Kaliumauswaschung.

Auch der pH-Wert des Bodens spielt bei der Kaliumauswaschung eine indirekte Rolle. Die Untersuchungen von PFAFF (1963) zeigten, daß die Auswaschung von Düngerkali auf dem saueren Sandboden etwas höher war als auf dem alkalischen Sandboden. Das wird mit dem Entzug durch die Pflanzen zu erklären sein.

N-Düngung setzt die K_2O -Auswaschung herab. Natronsalpeter macht hiervon eine Ausnahme und erhöht die K_2O -Auswaschung, da wahrscheinlich K^+ an seinen Sorptionsstellen durch Na^+ ausgetauscht werden kann.

Zur Frage der Kalkung zeigten die Untersuchungen von PFAFF (1963), daß eine Kalkung von 10 dz/ha $CaCO_3$ auf einem sauren und einem alkalischen Boden die Kaliumauswaschung nicht verstärkt bzw. erhöht hat. Nach KÖHNLEIN und KNAUER (1958) aber soll eine Kalkung die K_2O -Auswaschung herabsetzen. Die vermehrte K-Auswaschung auf den Parzellen ohne Kalk wird jedoch, wie Autoren meinen, nicht durch Austauschvorgänge bewirkt, sondern ist als eine Begleiterscheinung der stärkeren Kolloiddurchwaschung zu sehen. Ähnliche Beobachtung machten MAC INTIRE und Mitarbeiter (nach SCHOW und JOUNG, 1923). Sie erklären die Erscheinung damit, daß auf den ungekalkten Böden die H-Ionen der freien Kohlensäure die K-Ionen viel stärker austauschen können als die auf dem aufgekalkten Böden auftretenden Ca-Ionen. Nach LINSE (1966) wird die K_2O -Auswaschung durch Kalkung nicht erhöht.

Die meisten Autoren sind der Meinung, daß die Höhe der K_2O -Auswaschung wesentlich durch die Niederschlags- bzw. Sickerwassermengen bedingt ist (PFAFF, 1963; VÖMEL, 1963; LINSER, 1966). KÖHNLEIN und KNAUER (1958) sind jedoch der Ansicht, daß die Höhe der K_2O -Auswaschung nicht nur von der Menge des Sickerwassers abhängig ist, sondern vielmehr vom Kaligehalt eines Bodens. Sie stellen fest, daß selbst bei gleichbleibender oder sogar abnehmender Menge des Sickerwassers die ausgewaschene K_2O -Menge mit zunehmender Kalianreicherung im Boden ansteigt.

Die K_2O -Auswaschung kann durch den Gehalt an Kalium in Niederschlägen geringfügig verändert werden. So fanden SCHARRER und FAST (1955) eine K_2O -Zufuhr durch die Niederschläge von 6 kg K_2O /ha in einem halben Jahr. OTTERMANN und KRZYSCH (1965) haben eine K_2O -Zufuhr von 2,5 kg/ha und Jahr ermittelt. Dagegen konnten BÄTJER und KUNTZE (1962) im 2jährigen Durchschnitt 18 - 21,4 kg K_2O /ha und Jahr nachweisen. Die Autoren erklären diese hohen Werte damit, daß die Meßstellen in unmittelbarer Nähe der Küste lagen.

Ein hoher K_2O -Anteil im Niederschlagswasser kann zum Teil auf den Staubgehalt der Luft und dessen Herkunft zurückzuführen sein. So haben RIEHM und QUELLMALZ (1959) als Kaliumquellen ein Kohlenbergwerk, ein Kraftwerk und ein Kali-Bergwerk ermittelt.

B. Erster Hauptteil

I. Eigene Untersuchungen

Aus dem Literaturüberblick geht hervor, daß über Auswaschung einzelner Nährstoffe zahlreiche Arbeiten vorhanden sind. Über die gegenseitige Beeinflussung von Nährstoffen liegen jedoch kaum Arbeiten vor. Deshalb wurde die Aufmerksamkeit in den vorliegenden Untersuchungen besonders auf diesen Punkt gerichtet.

1. Material und Methodik

Für die Versuche wurden Säulen aus Glas verwendet. Daran schließt sich ein verengtes Auslaufstück an, das mit grobem Quarzsand und Kieselsteinen gefüllt wurde.

Sie bestehen aus 6 Abschnitten, wovon die obersten vier 5 cm, die beiden untersten 10 cm lang sind. Der innere Durchmesser beträgt 3 cm. Die einzelnen Säulenabschnitte wurden durch Tesa-Film zusammengehalten. Der Auslauf jeder Säule wurde mit Quarzsand und Kieselsteinen abgedeckt, um das Durchwaschen fester Bodenteilchen in das Sickerwasser zu verhindern. Danach wurde 40 cm, 2 mm gesiebter lufttrockener Boden in die Säulen eingefüllt. Darauf kam wiederum eine Quarzsandschicht von 5 cm Höhe.

Jede Säule wurde durch Zufuhr vom dest. Wasser, und zwar in 5 ml Portionen von oben, bis zur vollen Wassersättigung gebracht. Auf die Säulen wurden dann die berechneten Düngemittelgaben in 10 ml Lösung aufgebracht. Am unteren Auslauf wurde das Sickerwasser in kleinen Flaschen aufgefangen.

Während der Versuchsdauer von 50 Tagen wurden insgesamt 500 ml Wasser je Säule verabreicht, was einer Niederschlagsmenge von etwa 650 mm entspricht. Das gesammelte Sickerwasser wurde alle 10 Tage auf seinen NO_3^- , NH_4^- , PO_4^- und K-Gehalt untersucht.

Die beschriebene Versuchsanstellung weicht naturgemäß von praktischen Verhältnissen ab, weil die Bodensäulen während der gesamten Versuchsdauer stets die volle Wassersättigung aufwiesen. Die zugeführten 500 ml Wasser ergaben etwa 350 - 420 ml Sickerwasser, je nach Bodenart. Die Verluste sind durch Verdunstung sowohl auf der Oberfläche der Säulen als aus den Auffangflaschen zu erklären. Unter natürlichen Verhältnissen ist jedoch das Verhältnis von Niederschlagsmengen zu Sickerwassermengen nicht so eng, weil hier die Wasserverluste durch Evaporation und pflanzliche Transpiration stark ins Gewicht fallen.

Die für die Versuche verwendeten Böden stammen aus Hessen. Sie haben unterschiedliche pH-Werte und unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Zusammensetzung ihrer mineralischen Bestandteile als auch im Humusgehalt. Die Daten über die Böden sind in den Tabellen 2 und 3 zusammengestellt.

Tabelle 2
Charakterisierung der Versuchsböden

Böden	pH	Kcl %	N	Glüh- verlust	CaCO ₃ %	T-Wert mval/100gBad	C %
Lich	5,7	0,1575		5,71	0,09	23,67	1,26
Darmstadt	7,5	0,0819		1,20	2,37	3,01	0,16
Oberts- hausen	4,6	0,0679		1,97	-	3,49	0,66

Tabelle 3
Charakterisierung der Versuchsböden

Böden	Ton %	Schluff %	Feinsand %	Grobsand %	WK %	i. 100g Boden (DL-Methode) mgK ₂₀ mgP ₂₀ O ₅
Lich	29,5	63,1	1,9	5,5	47,5	11,6 22,8
Darmstadt	2,4	5,4	63,4	28,8	30,0	2,4 11,4
Oberts- hausen	3,7	20,4	13,6	62,0	28,0	6,2 8,1

Bei dem Boden Lich handelt es sich um den Ap-Horizont einer erodierten Parabraunerde, ein schwach humoser schluffiger bis schluffig-toniger Lehm. In der Tonfraktion dieses Bodens dominieren die illitischen Minerale, gefolgt vom Kaolinit. Boden Darmstadt ist schwach humoser mäßig CaCO_3 -haltiger Sand. Dagegen ist Boden Obertshausen ein schwach humoser schluffiger Sand mit stark saurer Reaktion. Dieser Boden bot nach Aufkalkung auf pH 7,5 Gelegenheit, den Einfluß der Bodenreaktion auf Verlagerung und Auswaschung der Nährstoffe zu untersuchen.

Zur Terminologie sei bemerkt, daß unter Auswaschung der Austritt der Nährstoffe aus dem Säulenende zu verstehen ist, unter Verlagerung die Bewegung der Nährstoffe innerhalb der Bodensäulen.

Mit den oben beschriebenen Böden wurden Auswaschungs- und Verlagerungsversuche durchgeführt. Ihnen lag folgender Versuchsplan zugrunde:

Versuchsplan

VR. 1. Ungedüngt

2. 200 kg/ha P_2O_5 als $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
3. 200 kg/ha P_2O_5 als $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
300 kg/ha N als $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$
4. 200 kg/ha P_2O_5 als $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
300 kg/ha N als NH_4NO_3
5. 200 kg/ha P_2O_5 als $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
300 kg/ha N als $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
6. 200 kg/ha P_2O_5 als $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
400 kg/ha K_2O als KCL
7. 200 kg/ha P_2O_5 als $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
400 kg/ha K_2O als KCL
300 kg/ha N als $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$

8. 200 kg/ha P_2O_5 als $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$
400 kg/ha K_2O als KCL
300 kg/ha N als NH_4NO_3
9. 200 kg/ha P_2O_5 als $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$
400 kg/ha K_2O als KCL
300 kg/ha N als $Ca(NO_3)_2$

Jede Versuchsreihe wurde in zweifacher Wiederholung angelegt.

2. Analysenmethoden

a. Stickstoffbestimmung

Stickstoffbestimmung erfolgte im Sickerwasser bzw. im Extrakt der einzelnen Säulenabschnitte nach der von BALKS und REEKERS (1955) entwickelten Methode. Die Analysenvorschrift ist folgende:

10 g Lufttrockener Boden werden mit 50 ml 1%iger Kalium-Aluminium-Sulfatlösung in einem 250-ccm-Stohmannkolben 15 Minuten lang in einer Schüttelmaschine (50 Umdrehungen/Minute) geschüttelt. Danach wird durch ein nitrat- und ammoniakfreies Faltenfilter (619 G 14) filtriert. Dieser Extrakt dient zur Nitrat- und Ammoniakstickstoffbestimmung.

Zur Nitratstickstoffbestimmung werden 2,5 ml Extrakt in einen 250-ccm-Erlenmeyerkolben mit Schliffstopfen gegeben und zunächst mit etwa 0,1 g 1, 2, 4-Xylenol und dann mit 22,5 ml 90 %iger Schwefelsäure versetzt. Der Kolben bleibt 15 Minuten stehen, nachdem er verschlossen und gut umgeschüttelt wurde. Danach werden 60 ml dest. Wasser hinzugegeben. Das Reaktionsgemisch läßt man Abkühlen. Danach wird die Lösung in einen Schütteltrichter überführt und mit 30 ml Äther ausgeschüttelt. Hierbei geht das Nitroxlylenol in die Ätherphase über. Sie wird von der wässrigen-Phase

abgetrennt. Der Ätherextrakt wird mit 10 ml 5 %iger NaOH 1 Minute lang durchgeschüttelt. Bei diesem Nitrierungsvorgang entsteht unter Gelbfärbung quantitativ das Nitroxlenol.

Die Messung erfolgt kolorimetrisch (entweder mit Zeiß-Wepho bei einer Wellenlänge von 433 mμ oder mit dem Elko II mit dem Filter 42 E).

Zur Ammoniakstickstoffbestimmung werden 5 ml Extrakt (sei es Bodenextrakt oder Sickerwasser) in ein 100-ml Stehkölbchen gegeben. Hintereinander werden mit 2,5 ml Polyviollösung 17,5 ml Wasser und 2 ml Seignettesalzlösung versetzt. Dabei muß nach jeder Reagenzienzufuhr gut umgeschüttelt werden. Unter Umschwenken des Kolbeninhalts wird 1 ml Neßler-Reagenz zugegeben. Die entstandene gelbe bis gelbbraune Färbung wird spätestens nach 20 Minuten in 10 mm Schichtdicke mit dem Elko II-Filter S 42 E gemessen.

Der Meßvorgang sollte innerhalb von 10 Minuten abgeschlossen sein, da die sich dann einsetzende Trübung eine exakte Messung unmöglich macht.

b. Kalium- und Phosphorsaurebestimmung sowohl im Sickerwasser als auch in den Bodenextrakten

Die Messung wurde flammenphotometrisch bzw. kolorimetrisch mittels der Vanadatmethode durchgeführt. Die flammenfotometrischen Kaliumbestimmungen wurden mit dem Zeiss-Spektralphotometer oder dem Atom-Absorptionsspektralphotometer als ~~Emmisions~~emissionsmessung ausgeführt.

Die Extraktion von Kalium und Phosphat in den einzelnen Säulenabschnitten erfolgte mittels der Doppel-Laktat-Methode nach EGNER-RIEHM (1948).

II. Ergebnisse der Sickerwasser-Untersuchung

Die Menge des Sickerwassers aller Bodensäulen war abgesehen von kleinen Schwankungen einheitlich, wie dies aus der Tabelle (4) ersichtlich ist.

Säule	Lehmboden sauer (Lich) in ml	Sandboden sauer (Obertsh.) in ml	Sandboden aufgek. (Obertsh.) in ml	Sandboden neutral (Darmstadt) in ml
1/ 2	422	349	317	371
3/ 4	413	359	330	386
5/ 6	396	346	326	347
7/ 8	406	346	329	378
9/10	405	343	337	357
11/12	411	330	340	376
13/14	404	350	326	391
15/16	416	335	330	375
17/18	418	354	330	378

Bei dem Boden Lich war die Menge des Sickerwassers mit durchschnittlich 410,3 ml am höchsten. Der Boden Darmstadt nahm eine mittlere Stellung ein (372,2 ml), während die Sickerwassermenge mit 328,2 ml bei dem Boden Obertshausen noch niedriger lag (Obertsh. I, 334,4 ml; Obertsh. II, 329,9 ml).

Die zugeführten 500 ml Wasser ergaben etwa 330 - 410 ml Sickerwasser, je nach Bodenart. Die Verluste sind durch Verdunstung sowohl auf der Oberfläche der Säulen als aus den Auffangfläschchen zu erklären.

1. Auswaschung von Nitratstickstoff

Es wurden bei allen Böden aus den Bodensäulen in 50 Tagen ausgewaschener Nitratstickstoff bestimmt, bzw. der zeitliche Verlauf der Auswaschung ermittelt. Die Nitratstickstoffanalysen wurden mit zwei Parallelen durchgeführt.

a. Versuchsergebnisse und Diskussion

Die Nitratwerte zeigen, daß bei der gegebenen Versuchsanstellung aus jedem Boden Nitratstickstoff ausgewaschen wurde.

Im Sickerwasser des Bodens Lich (pH 5,7) bestanden bei der ersten Probeentnahme, d. h. nach der 1. Dekade, wesentliche Unterschiede in der Nitratstickstoffauswaschung der einzelnen Bodensäulen (Tabelle 5, S.28).

Tabelle 5

Auswaschung von Nitratstickstoff beim Boden "Lich" (21.2.68 - 2.4.68)

Säule Düngung	Zeitraum	NO ₃ -N (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	NO ₃ -N (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	NO ₃ -N (mg)
1/2 Ungedüngt	1. Dekade	1,00	7/8 P ₂ O ₅	1. Dekade	2,26	13/14 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,67
	2. "	0,82	N (AN)	2. "	4,16	N (AS)	2. "	2,15
	3. "	0,56	14 mg P ₂ O ₅	3. "	3,51	K ₂ O	3. "	3,08
	4. "	0,54	21 mg N	4. "	1,48	14 mg P ₂ O ₅	4. "	1,96
	5. "	0,65		5. "	1,65	21 mg N	5. "	2,05
	Gesamt	3,57		Gesamt	13,06	28 mg K ₂ O	Gesamt	9,91
3/4 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,93	9/10 P ₂ O ₅	1. Dekade	4,20	15/16 P ₂ O ₅	1. Dekade	2,62
14 mg P ₂ O ₅	2. "	0,95	N (KS)	2. "	5,61	N (AN)	2. "	4,22
	3. "	0,70	14 mg P ₂ O ₅	3. "	5,29	K ₂ O	3. "	3,56
	4. "	0,45	21 mg N	4. "	2,42	14 mg P ₂ O	4. "	2,08
	5. "	0,65		5. "	2,54	21 mg N	5. "	1,26
	Gesamt	3,68		Gesamt	20,06	28 mg K ₂ O	Gesamt	13,74
5/6 P ₂ O ₅	1. Dekade	1,57	11/12 P ₂ O ₅	1. Dekade	1,38	17/18 P ₂ O ₅	1. Dekade	5,30
N (AS)	2. "	2,49	K ₂ O	2. "	0,79	N (KS)	2. "	5,24
14 mg P ₂ O ₅	3. "	2,26	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,58	K ₂ O	3. "	4,02
21 mg N	4. "	1,53	28 mg K ₂ O	4. "	0,69	14 mg P ₂ O ₅	4. "	3,34
	5. "	1,60		5. "	0,92	21 mg N	5. "	2,87
	Gesamt	9,45		Gesamt	4,36	28 mg K ₂ O	Gesamt	20,77

Das Sickerwasser der mit Kalksalpeter (sowohl einzeln als auch in der Kombination mit KCL) gedüngten Säulen weist den höchsten Gehalt an Nitratstickstoff auf. Der Gehalt bei dem mit schwefelsaurem Ammoniak behandelten Säulen liegt erheblich niedriger, während er bei den mit Ammonnitrat behandelten eine mittlere Stellung einnimmt.

Bei der zweiten Probeentnahme wurde ein weiteres Ansteigen der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte deutlich. Hier lagen die Gehalte des Sickerwassers der mit stickstoffhaltigen Düngemitteln gedüngten Säulen noch höher. Es wurden hier, im Vergleich zur ersten Dekade, die 0,5 bis 2fache Menge an Nitratstickstoff ausgewaschen. Lediglich bei Variante 6 (P + K) nahm die Menge des ausgewaschenen $\text{NO}_3\text{-N}$ ab.

In den ersten 6 Varianten wurden in der 3. und 4. Dekade geringe Mengen an Nitrat-N ausgewaschen; bei Anwesenheit von KCL (Var. 7 - 9) sind die Auswaschungsverluste in ersten Dekaden wesentlich höher als in den entsprechenden Varianten 3 - 5 (ohne K).

In allen Varianten zeichnete sich in der fünften Probeentnahme wieder eine geringe Zunahme gegenüber der vorletzten Dekade ab. Insgesamt fällt auf, daß die zusätzliche Kaliumdüngung eine erhöhte Nitrat-auswaschung zur Folge hatte, sowohl in den Varianten ohne N als auch in denjenigen mit N-Düngung. Es kann aus diesen bei K-Düngung erhöhten Nitratverlusten geschlossen werden, daß die K-Düngung sorptiv gebundenen $\text{NH}_4\text{-N}$ freigesetzt hat, der später nitrifiziert und ausgewaschen wurde.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß von dem Stickstoff des schwefelsauren Ammoniaks 27,5 % als Nitrat-N, von dem des Ammoniumnitrats 44,6 % als

Nitrat-N und von dem des Calciumnitrats 78 % als Nitrat-N ausgewaschen wurden. Die entsprechenden Werte für die Säulen mit KCL-Düngung betrugen 26,5 - 44,7 - 78,1 %.

Bei dem sauren Boden Obertshausen I (pH 4,6) ergaben sich im Sickerwasser der ersten Probenahme sehr geringe Nitratstickstoffwerte, die weit unter denen des Lehmbodens "Lich" liegen (siehe Tabelle 6, S. 31). Die Nitratauswaschung setzte kräftiger bei der zweiten Probenahme ein. Besonders weisen die mit Calciumnitrat gedüngten Bodensäulen, gefolgt von den mit Ammoniumnitrat gedüngten, eine erhebliche Nitratauswaschung auf. Das Sickerwasser der mit Calciumnitrat gedüngten Varianten enthielt etwa 1,5 bis 2 mal höhere Werte an Nitratstickstoff als beim schwefelsauren Ammoniak. Bei mit Kaliumchlorid kombinierten N-Düngern zeichnete sich ebenfalls ein Anstieg der Auswaschungswerte ab. Bei der dritten Probeentnahme wurde eine leichte Abnahme der Nitratauswaschung im Sickerwasser aller Varianten festgestellt. Diese Tendenz änderte sich bei der vierten Probeentnahme. Hier lagen die Nitrat-Werte zum Teil höher, während bei einigen Varianten, und zwar bei der AN-Säule, KS-Säule und bei der kombinierten KS + KCL eine geringe Abnahme zu verzeichnen war.

Eine erhöhte Nitratauswaschung trat bei der fünften Probeentnahme im Sickerwasser aller Varianten ein. Somit nahmen die Auswaschungsverluste in dieser Periode erneut zu.

Diese Zunahme ist darauf zurückzuführen, daß der ursprüngliche Boden eine gewisse Menge an Nitratstickstoff enthielt. Erst mit zunehmender Bewässerungsdauer, und damit durch Verbesserung von Nitrifikationsbedingungen, wurde vorhandenes Ammoniak in

Tabelle 6

Auswaschung von Nitratstickstoff beim Boden "Obertshausensauer" (7.12.68 - 16.1.69)

Säule Düngung	Zeitraum	NO ₃ -N (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	NO ₃ -N (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	NO ₃ -N (mg)
1/2 Ungedüngt	1. Dekade	0,64	7/8 P ₂ O ₅	1. Dekade	1,50	13/14 P ₂ O ₅	1. Dekade	1,41
	2. D "	0,36	N (AN)	2. "	4,48	N (AS)	2. "	2,21
	3. "	0,36	14 mg P ₂ O ₅	3. "	3,41	K ₂ O	3. "	1,46
	4. "	1,14	21 mg N	4. "	2,27	14 mg P ₂ O ₅	4. "	1,89
	5. "	1,17		5. "	2,73	21 mg N	5. "	3,69
	Gesamt	3,67		Gesamt	14,39	28 mg K ₂ O	Gesamt	10,66
3/4 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,85	9/10 P ₂ O ₅	1. Dekade	3,94	15/16 P ₂ O ₅	1. Dekade	1,75
14 mg P ₂ O ₅	2. "	0,45	N (KS)	2. "	5,46	N (AN)	2. "	3,93
	3. "	0,40	14 mg P ₂ O ₅	3. "	4,81	K ₂ O	3. "	2,70
	4. "	0,87	21 mg N	4. "	3,56	14 mg P ₂ O ₅	4. "	2,77
	5. "	1,21		5. "	5,80	21 mg N	5. "	3,99
	Gesamt	3,78		Gesamt	22,57	28 mg K ₂ O	Gesamt	15,14
5/6 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,95	11/12 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,86	17/18 P ₂ O ₅	1. Dekade	3,99
N (AS)	2. "	2,64	K ₂ O	2. "	1,12	N (KS)	2. "	5,48
14 mg P ₂ O ₅	3. "	1,83	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,29	K ₂ O	3. "	4,90
21 mg N	4. "	2,06	28 mg K ₂ O	4. "	0,65	14 mg P ₂ O ₅	4. "	3,82
	5. "	2,37		5. "	1,58	21 mg N	5. "	4,95
	Gesamt	9,85		Gesamt	4,50	28 mg K ₂ O	Gesamt	23,14

Nitrat überführt, das dann ausgewaschen werden konnte. Hierfür sprechen die erhöhten $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte. So war in der ersten Entnahme die Nitratauswaschung bei der ungedüngten Säule 0,64 mg $\text{NO}_3\text{-N}$, während sie nach der fünften Dekade bei der gleichen Säule 1,17 mg $\text{NO}_3\text{-N}$ betrug.

Zusammenfassend wurde bei dem sauren Boden Obertshausen von dem zugeführten N-Dünger wie folgt ausgewaschen: Von dem Stickstoff des schwefelsauren Ammoniaks 28,9 % als $\text{NO}_3\text{-N}$, von dem des Ammoniumnitrats 50,5 % als $\text{NO}_3\text{-N}$ und von dem des Calciumnitrats 89,4 % als $\text{NO}_3\text{-N}$ ausgewaschen wurden. Die entsprechenden Werte für die Säulen mit K-Düngung betrugen 29,3 - 50,4 - 88,8 %.

Der Boden Obertshausen I (pH 4,6) wurde auf pH 7,5, also das pH des Darmstädter Bodens aufgekalkt, um den Einfluß der Kalkung auf die Nährstoffauswaschung zu untersuchen. Dafür wurde die hydrolytische Azidität dessauren Bodens nach KAPPEN (1929) bestimmt. Nach der Aufkalkung wurde der Boden 4 Wochen lang stehen gelassen. Vor dem Einfüllen in die Säulen wurde erneut eine pH-Messung vorgenommen.

Bei dem Obertshausen II (pH 7,5) waren die Nitratstickstoffwerte im allgemeinen wesentlich höher als bei dem Boden Obertshausen I (siehe Tabelle 7, S. 33). Die Ursache liegt wohl darin, daß das Vorhandensein des Calciums, Kaliums und Düngerstickstoffs ein günstiges Milieu für die Mikroorganismen-tätigkeit geschaffen hat. Andererseits wurde wahrscheinlich das im Gitter fixierte bzw. an die Oberfläche sorbierte Ammonium durch Austausch mit Kalium frei, das dann von Mikroorganismen nitrifiziert werden konnte. Hinzu kommt, daß die maximale Wasserkapazität der Sandböden viel niedriger als die des Lehm-bodens ist, was sicherlich die Nitrifizierung des durch Austausch mit Kalium frei gewordenen Ammoniums positiv beeinflusste.

Tabelle 7

Auswaschung von Nitratstickstoff beim Boden "Obertshausenaufgekalkt" (24.5.69 - 3.7.69)

Säule Düngung	Zeitraum	NO ₃ -N (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	NO ₃ -N (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	NO ₃ -N (mg)
1/2 Ungedüngt	1. Dekade	1,00	7/8 P ₂ O ₅	1. Dekade	2,74	13/14 P ₂ O ₅	1. Dekade	2,94
	2. "	1,38	N (AN)	2. "	5,04	N (AS)	2. "	3,65
	3. "	0,98	14 mg P ₂ O ₅	3. "	4,40	K ₂ O	3. "	2,94
	4. "	0,76	21 mg N	4. "	2,87	14 mg P ₂ O ₅	4. "	1,99
	5. "	0,11		5. "	2,36	21 mg N	5. "	0,81
	Gesamt	4,23		Gesamt	17,41	28 mg K ₂ O	Gesamt	12,33
3/4 P ₂ O ₅ 14 mg P ₂ O ₅	1. Dekade	1,00	9/10 P ₂ O ₅	1. Dekade	4,84	15/16 P ₂ O ₅	1. Dekade	3,97
	2. "	1,38	N (Ks)	2. "	6,86	N (AN)	2. "	5,04
	3. "	1,00	14 mg P ₂ O ₅	3. "	6,32	K ₂ O	3. "	5,35
	4. "	0,78	21 mg N	4. "	4,91	14 mg P ₂ O ₅	4. "	2,58
	5. "	0,18		5. "	2,32	21 mg N	5. "	1,38
	Gesamt	4,34		Gesamt	25,25	28 mg K ₂ O	Gesamt	18,22
5/6 P ₂ O ₅ N(AS)	1. Dekade	2,64	11/12 P ₂ O ₅	1. Dekade	1,20	17/18 P ₂ O ₅	1. Dekade	5,61
	2. "	2,78	K ₂ O	2. "	1,28	N (AS)	2. "	6,60
	3. "	4,09	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,92	K ₂ O	3. "	5,49
	4. "	1,72	28 mg K ₂ O	4. "	1,05	14 mg P ₂ O ₅	4. "	4,70
	5. "	0,27		5. "	0,66	21 mg N	5. "	3,64
	Gesamt	11,50		Gesamt	5,11	28 mg K ₂ O	Gesamt	26,04

In allen Reihen trat eine erhöhte $\text{NO}_3\text{-N}$ -Auswaschung ein, wie dies aus den Ergebnissen der Tabelle 7 ersichtlich ist.

Im Sickerwasser der mit Calciumnitrat und $\text{KCL} + \text{Ca} (\text{NO}_3)_2$ gedüngten Varianten (5 und 9) wurde in der ersten Probenahme die höchste Nitratauswaschung nachgewiesen. Auf Calciumnitrat folgte Ammonnitrat und zwar mit und ohne Kaliumdüngung. An der dritten Stelle lagen die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Verluste der mit schwefelsaurem Ammoniak gedüngten Varianten 3 und 7.

Im Sickerwasser der zweiten Probeentnahme hielt die Steigerung der Nitratauswaschung weiterhin an. In dieser Periode nahmen die Auswaschungsverluste besonders in den Varianten mit Calciumnitrat kräftig zu, und zwar 6,86 mg NO_3 in Variant 3; in Kombination mit Kaliumchlorid (in Variant 9) 6,60 mg $\text{NO}_3\text{-N}$.

Die Auswaschungsverluste an Nitratstickstoff in der dritten Dekade sind noch groß, verglichen mit den Werten der zweiten Entnahme zeichnete sich eine geringe Abnahme der Nitrat-Werte ab. Fast 60 % der ausgewaschenen $\text{NO}_3\text{-N}$ -Menge fanden sich in den ersten 3 Dekaden. Eine weitere Abnahme wiesen die 4. und 5. Probeentnahme auf.

Zusammenfassend wurde von dem Stickstoff des schwefelsauren Ammoniaks 34 % als $\text{NO}_3\text{-N}$, von dem des Ammoniumnitrats 62,2 % als $\text{NO}_3\text{-N}$ und von dem des Calciumnitrats 100 % als $\text{NO}_3\text{-N}$ ausgewaschen. Die entsprechenden Werte für die Säulen mit KCL -Düngung betrugen 34,3 - 62,4 - 99,7 %. Die Untersuchung des Sickerwassers bei dem neutralen Boden Darmstadt (pH 7,5) brachte bei der ersten Probenahme ähnlich hohe Nitratstickstoffwerte, wie bei dem aufgekalkten Boden Obertshausen II (s. Tabelle 8).

Auswaschung von Nitratstickstoff beim Boden "Darmstadtneutral" (13.69 - 20.4.69)

Säule	Düngung	Zeitraum	NO ₃ -N (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum	NO ₃ -N (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum	NO ₃ -N (mg)
1/2	Ungedüngt	1. Dekade	0,99	7/8	P ₂ O ₅	1. Dekade	2,27	13/14	P ₂ O ₅	1. Dekade	1,42
		2. "	0,58		N (AN)	2. "	3,15		N (AS)	2. "	3,77
		3. "	0,52		14 mg P ₂ O ₅	3. "	5,27		K ₂ O	3. "	3,96
		4. "	0,84		21 mg N	4. "	3,76		14 mg P ₂ O ₅	4. "	1,29
		5. "	1,02			5. "	2,15		21 mg N ₂ O ₅	5. "	0,88
		Gesamt	3,95			Gesamt	16,60		28 mg K ₂ O	Gesamt	11,32
3/4	P ₂ O ₅	1. Dekade	1,05	9/10	P ₂ O ₅	1. Dekade	3,45	15/16	P ₂ O ₅	1. Dekade	2,94
	14 mg P ₂ O ₅	2. "	0,59		N (KS)	2. "	6,52		N (AN)	2. "	4,41
		3. "	0,56		14 mg P ₂ O ₅	3. "	6,07		K ₂ O	3. "	4,74
		4. "	0,84		21 mg N	4. "	3,25		14 mg P ₂ O ₅	4. "	1,60
		5. "	1,02			5. "	4,53		21 mg N ₂ O ₅	5. "	2,57
		Gesamt	4,06			Gesamt	23,82		28 mg K ₂ O	Gesamt	17,26
5/6	P ₂ O ₅	1. Dekade	1,21	11/12	P ₂ O ₅	1. Dekade	1,46	17/18	P ₂ O ₅	1. Dekade	4,80
	N (AS)	2. "	3,01		K ₂ O	2. "	1,06		N (AS)	2. "	6,64
	14 mg P ₂ O ₅	3. "	2,52		14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,50		K ₂ O	2. "	6,61
	21 mg N	4. "	2,80		28 mg K ₂ O	4. "	0,71		14 mg P ₂ O ₅	4. "	2,40
		5. "	1,07			5. "	0,96		21 mg N ₂ O ₅	5. "	4,05
		Gesamt	10,61			Gesamt	4,69		28 mg K ₂ O	Gesamt	24,50

In sämtlichen mit N gedüngten Varianten trat in der zweiten Probeentnahme eine deutliche Erhöhung der Nitratstickstoffauswaschung ein.

Eine geringe Abnahme zeichnete sich mit Ausnahme der mit schwefelsaurem Ammoniak und Kaliumchlorid und Ammoniumnitrat gedüngten Varianten (3 und 8) in der dritten Probenahme ab. Hier wurde jedoch fast die gleiche Menge an Nitrat ausgewaschen wie in der 2. Dekade.

Auffallend bei der vierten Probenahme sind ziemlich starke Abnahmen an $\text{NO}_3\text{-N}$ in Varianten 7 - 9, d.h. dort, wo die verschiedenen N-Düngemittel mit der K-Düngung kombiniert wurden.

Die fünfte Probeentnahme zeigte wieder einen Anstieg der Nitratauswaschung. Nur die Varianten 3 und 4 (AS und AN) machten hiervon eine Ausnahme und wiesen niedrigere Werte auf.

Zusammenfassend wurde von dem Stickstoff des schwefelsauren Ammoniaks 31,1 %, von dem des Ammoniumnitrats 59,7 % und von dem des Calciumnitrats 94,0 % ausgewaschen. Die entsprechenden Werte für die Varianten mit KCL-Düngung betrugen 31,5 - 59,8 - 94,3 %.

Bisher war der zeitliche Verlauf der Nitratauswaschung in den drei Dekaden am stärksten. Mit fortschreitender Beregnung trat eine mehr oder weniger starke Verarmung an Nitratstickstoff in den Böden ein. Die Versuche führten ferner zu dem Ergebnis, daß aus allen Böden bodeneigener Nitratstickstoff ausgewaschen wurde und zwar in erheblichen Mengen. So wurde aus dem sauren Lehm Boden Lich am wenigsten Nitrat-N, 3,57 mg und aus dem aufgekalkten Boden Obertshausen II am meisten Nitrat-N (4,23 mg) ausgewaschen. Die zweithöchste Nitrat-N-Auswaschung zeigte der neutrale Sandboden Darmstadt mit 3,95 mg

Nitrat-N, während der saure Lehm Boden Obertshausen mit 3,67 mg $\text{NO}_3\text{-N}$ an der dritten Stelle steht. In Tabelle 9, S. 38, sind die Auswaschungsverluste an $\text{NO}_3\text{-N}$ in kg/ha aufgeführt.

Bei den Varianten 5 und 9 fällt auf, daß ein erheblicher Teil des mit der Düngung zugeführten Stickstoffs als $\text{NO}_3\text{-N}$ ausgewaschen wurde.

Die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte der Varianten 3 und 7 sind am geringsten, während die Nitrat-Werte der Variante 4 und 8 eine mittlere Stellung einnehmen.

Durch die Phosphatdüngung in Variante 2 wurden die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Verluste nur wenig verändert. Anders ist die Wirkung der Kalidüngung. Hier wurde die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Auswaschung in sämtlichen Varianten, sei es mit oder ohne Stickstoff, merklich erhöht, wie dies aus der unten aufgeführten Tabelle hervorgeht.

Die Auswaschung von Nitratstickstoff (mg $\text{NO}_3\text{-N}$)
in 50 Tagen bei 4 Versuchsböden.

Variante	Lehm Boden sauer (Lich)	Sandboden sauer (Oberts.I)	Sandboden aufgek. (Oberts.II)	Sandboden neutral (Darmstadt)
Ungedüngt	3,71	3,21	6,68	5,01
14 mg P_2O_5	4,18	4,20	6,82	2,18
14 mg P_2O_5	6,58	6,66	9,00	6,08
28 mg K_2O				

Tabelle 9

Gesamtauswaschung von Nitratstickstoff
(kg NO₃-N/ha) in 50 Tagen bei 4 Versuchsböden

	Lehmboden sauer (Lich)	Sandboden sauer (Oberts- hausen I)	Sandboden aufgekalkt (Oberts- hausen II)	Sandboden neutral (Darmstadt)
1. Ungedüngt	51,0	52,4	60,4	56,4
2. 200 kg/ha P ₂ O ₅ als Monocalciumphosphat	52,5	54,0	61,0	58,0
3. 200 kg P ₂ O ₅ 300 kg/ha N (AS)	135,0	140,7	163,2	151,5
4. 200 kg/ha P ₂ O ₅ 300 kg/ha N (AN)	186,5	205,5	247,7	237,1
5. 200 kg/ha P ₂ O ₅ 300 kg/ha N (KS)	286,5	322,4	363,2	340,2
6. 200 kg/ha P ₂ O ₅ 400 kg/ha K ₂ O als Kaliumchlorid	61,9	64,2	73,0	67,0
7. 200 kg/ha P ₂ O ₅ 400 kg/ha K ₂ O 300 kg/ha N (AS)	141,2	152,2	176,1	161,7
8. 200 kg/ha P ₂ O ₅ 400 kg/ha K ₂ O 300 kg/ha N (AN)	196,0	216,3	260,2	246,5
9. 200 kg/ha P ₂ O ₅ 400 kg/ha K ₂ O 300 kg/ha N (KS)	296,4	330,5	372,0	350,0

b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse

1. Nach Abschluß 50-tägiger Bewässerungszeit, in der auf jede Säule 500 ml H_2O in Teilgaben von je 5 ml zugeführt wurde, fiel auf allen Böden die höchste NO_3 -N-Auswaschung in die ersten drei Dekaden (also in 30 Tagen). Die in dieser Zeit ermittelte NO_3 -N-Menge machte bei allen Böden weit mehr als die Hälfte des insgesamt ausgewaschenen Nitratstickstoffs aus.
2. In der letzten Dekade war meistens ein erneuter leichter Anstieg der NO_3 -N-Auswaschung zu verzeichnen. Das ist darauf zurückzuführen, daß mit zunehmender Bewässerungszeit und damit verbesserten Nitrifikationsbedingungen Ammoniak in Nitrat überführt wurde, das dann ausgewaschen werden konnte.
3. Die höchste NO_3 -N-Auswaschung aus den mineralischen N-Düngern wurde erwartungsgemäß bei Kalksalpeter und die niedrigste bei schwefelsaurem Ammoniak ermittelt. Eine Mittelstellung nahm das Ammoniumnitrat ein.
4. Aus allen Böden wurden beträchtliche Mengen von bodeneigenem Stickstoff ausgewaschen, insbesondere bei neutraler Bodenreaktion. Die Auswaschung von bodeneigenem Nitrat zeigt keine Beziehung zum Gesamt-N-Gehalt der Böden (siehe Tabelle 2u.9).
5. Die Aufkalkung eines sauren Sandbodens führte zu einer verstärkten NO_3 -Auswaschung.
6. Während eine Phosphatdüngung die Auswaschung von Nitrat kaum beeinflusste, führte eine K-Düngung, sowohl allein als auch zusammen mit verschiedenen N-Düngemitteln, zu einer deutlichen Erhöhung der Nitratauswaschung.

2. Auswaschung des Ammoniakstickstoffs

Neben Nitrat-N wurde im Sickerwasser gleichzeitig NH_4 -N bestimmt, und zwar nach der auf Seite 24 beschriebenen Methode von BALKS und REEKERS (1955).

a. Versuchsergebnisse und Diskussion

Angaben über die Mengen an ausgewaschenem NH_4 -N sind in den Tabellen 10, 11, 12 und 13 enthalten. Die Ergebnisse zeigen, daß die Ammoniakstickstoffverluste zwar unterschiedlich, aber insgesamt doch sehr gering sind.

Bei der ersten Probeentnahme des Bodens Lich wurde in allen Varianten eine niedrige NH_4 -N-Auswaschung festgestellt (siehe Tab. 10). Die geringen Auswaschungsverluste nahmen bei der zweiten Probeentnahme noch ab. Lediglich in Var. 3 (schwefels. Ammoniak) nahm die NH_4 -Auswaschung leicht zu.

In der dritten Probeentnahme waren die Auswaschungswerte im allgemeinen denen der zweiten etwa gleich. Nur bei den mit den einzelnen N-Düngern gedüngten Säulen zeichnete sich eine leichte Erhöhung der NH_4 -N-Werte ab.

Im Sickerwasser der vierten Probeentnahme wurde eine Steigerung der NH_4 -N-Verluste bei den sämtlichen mit KCL gedüngten Varianten beobachtet. Bei den übrigen Varianten zeichnete sich eine weitere Abnahme der NH_4 -N-Werte ab. Dies war ebenfalls bei der fünften Probeentnahme der Fall.

Die Sickerwässer des Bodens Obertshausen I enthielten nach der ersten Dekade deutlich größere Mengen an Ammoniakstickstoff als die des Bodens Lich (siehe Tab. 11).

Tabelle 10

Auswaschung von Ammoniumstickstoff beim Boden "Lich" (21.2.68 - 2.4.68)

Säule Düngung	Zeitraum	NH ₄ -N (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	NH ₄ -N (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	NH ₄ -N (mg)
1/2 Ungedüngt	1. Dekade	0,11	7/8 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,20	13/14 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,24
	2. "	0,05	P (AN)	2. "	0,04	N (AS)	2. "	0,16
	3. "	0,07	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,14	K ₂ O	3. "	0,10
	4. "	0,04	21 mg N	4. "	0,13	14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,17
	5. "	0,09		5. "	0,06	21 mg N	5. "	0,04
	Gesamt	0,36		Gesamt	0,57	28 mg K ₂ O	Gesamt	0,71
3/4 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,09	9/10 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,14	15/16 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,17
14 mg P ₂ O ₅	2. "	0,07	N (KS)	2. "	0,09	N (AN)	2. "	0,12
	3. "	0,07	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,03	K ₂ O	3. "	0,12
	4. "	0,07	21 mg N	4. "	0,05	14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,17
	5. "	0,07		5. "	0,06	21 mg N	5. "	0,10
	Gesamt	0,37		Gesamt	0,37	28 mg K ₂ O	Gesamt	0,68
5/6 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,13	12/12 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,17	17/18 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,17
N (AS)	2. "	0,21	K ₂ O	2. "	0,06	N (KS)	2. "	0,06
14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,11	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,06	K ₂ O	3. "	0,07
21 mg N	4. "	0,07	28 mg K ₂ O	4. "	0,12	14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,12
	5. "	0,07		5. "	0,08	21 mg N	5. "	0,08
	Gesamt	0,59		Gesamt	0,49	28 mg K ₂ O	Gesamt	0,50

Tabelle 11

Auswaschung von Ammoniumstickstoff beim Boden "Obertshausensauer" (7.12.1968 - 16.1.1969)

Säule	Düngung	Zeitraum $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum	$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg)
1/2	Ungedüngt	1. Dekade 0,32 2. " 0,22 3. " 0,07 4. " 0,09 5. " 0,12 Gesamt 0,82	7/8	P_2O_5 N (NN) 14 mg P_2O_5 21 mg N	1. Dekade 0,24 2. " 0,26 3. " 0,20 4. " 0,13 5. " 0,25 Gesamt 1,08	13/14	P_2O_5 N (NS) K_2O 14 mg P_2O_5 21 mg N 28 mg K_2O	1. Dekade 2. " 3. " 4. " 5. " Gesamt	0,21 0,39 0,14 0,10 0,36 1,20
3/4	P_2O_5 14 mg P_2O_5	1. Dekade 0,24 2. " 0,18 3. " 0,09 4. " 0,12 5. " 0,18 Gesamt 0,81	9/10	P_2O_5 N (KS) 14 mg P_2O_5 21 mg N	1. Dekade 0,26 2. " 0,22 3. " 0,09 4. " 0,07 5. " 0,19 Gesamt 0,83	15/16	P_2O_5 N (NN) K_2O 14 mg P_2O_5 21 mg N 28 mg K_2O	1. Dekade 2. " 3. " 4. " 5. " Gesamt	0,42 0,30 0,10 0,08 0,24 1,14
5/6	P_2O_5 N (NS) 14 mg P_2O_5 21 mg	1. Dekade 0,25 2. " 0,36 3. " 0,12 4. " 0,10 5. " 0,29 Gesamt 1,12	11/12	P_2O_5 K_2O 14 mg P_2O_5 28 mg K_2O	1. Dekade 0,15 2. " 0,18 3. " 0,11 4. " 0,05 5. " 0,37 Gesamt 0,86	17/18	P_2O_5 N (KS) K_2O 14 mg P_2O_5 21 mg N 28 mg K_2O	1. Dekade 2. " 3. " 4. " 5. " Gesamt	0,31 0,25 0,06 0,11 0,14 0,87

Bei den mit den einzelnen N-Düngern gedüngten Säulen zeichnete sich in der zweiten Probeentnahme ein geringfügiger Anstieg der NH_4 -Werte ab. Bei den übrigen Varianten jedoch wurden noch geringere Werte für NH_4 -N-Auswaschung ermittelt.

Die Auswaschungsverluste an Ammoniakstickstoff waren in allen Varianten bei der dritten und vierten Probeentnahme etwa gleich niedrig.

Bei der fünften Probeentnahme setzte wieder eine allgemeine leichte Erhöhung der NH_4 -N-Auswaschung ein.

Der aufgekalkte Boden Obertshausen zeigte (siehe Tabelle 12) in allen Varianten höhere NH_4 -Verluste als der ursprüngliche saure Boden Obersthausen I.

In allen Varianten ergaben sich bei der zweiten Probeentnahme niedrigere NH_4 -N-Werte. Sie nahmen bei der dritten Probeentnahme weiterhin deutlich ab und unterscheiden sich kaum von den Werten der vierten Dekade. In der fünften Dekade trat bei den meisten Varianten erneut ein leichter Anstieg der NH_4 -Auswaschung ein.

Bei dem Boden Darmstadt sind die Auswaschungsverluste am niedrigsten von allen Böden. Bei der ersten Probeentnahme schwanken die Auswaschungsverluste für Ammoniakstickstoff.

Der Verlauf der NH_4 -N-Auswaschung zeigt, daß im allgemeinen mit fortschreitender Dekade eine allmähliche Abnahme der NH_4 -Auswaschung zu verzeichnen ist, wenn man von kleineren Schwankungen absieht (siehe Tabelle 13).

Allgemein kann für alle Böden und alle Varianten gesagt werden, daß zu Beginn des Versuchs die NH_4 -Auswaschung am höchsten war, in den mittleren Dekaden deutlich abfiel und zum Schluß wieder leicht anstieg.

Tabelle 12

Auswaschung von Ammoniumstickstoff beim Boden "Obertshausenaufgekalkt" (24.5.69 - 3.7.69)

Säule Düngung	Zeitraum $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg)	Säule Düngung	Zeitraum $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg)	Säule Düngung	Zeitraum $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg)
1/2 Ugedüngt	1. Dekade 0,34 2. " 0,20 3. " 0,09 4. " 0,08 5. " 0,23 Gesamt 0,94	7/8 P_2O_5 N (NN) 14 mg P_2O_5 21 mg N	1. Dekade 0,50 2. " 0,41 3. " 0,10 4. " 0,09 5. " 0,13 Gesamt 1,23	13/14 P_2O_5 N (NS) K_2O 14 mg P_2O_5 21 mg N 28 mg K_2O	1. Dekade 0,44 2. " 0,34 3. " 0,20 4. " 0,18 5. " 0,20 Gesamt 1,36
3/4 P_2O_5 14 mg P_2O_5	1. Dekade 0,45 2. " 0,23 3. " 0,11 4. " 0,06 5. " 0,09 Gesamt 0,94	9/10 P_2O_5 N (KC) 14 mg P_2O_5 21 mg N	1. Dekade 0,45 2. " 0,30 3. " 0,11 4. " 0,04 5. " 0,04 Gesamt 0,94	15/16 P_2O_5 N (NN) K_2O 14 mg P_2O_5 21 mg N_2O_5 28 mg K_2O	1. Dekade 0,41 2. " 0,39 3. " 0,20 4. " 0,10 5. " 0,14 Gesamt 1,24
5/6 P_2O_5 N (NS) 14 mg P_2O_5 21 mg N	1. Dekade 0,50 2. " 0,44 3. " 0,13 4. " 0,08 5. " 0,13 Gesamt 1,28	11/12 P_2O_5 K_2O 14 mg P_2O_5 28 mg K_2O	1. Dekade 0,36 2. " 0,27 3. " 0,09 4. " 0,07 5. " 0,20 Gesamt 0,99	17/18 P_2O_5 N (KS) K_2O 14 mg P_2O_5 21 mg N_2O_5 28 mg K_2O	1. Dekade 0,36 2. " 0,25 3. " 0,09 4. " 0,08 5. " 0,16 Gesamt 0,92

Tabelle 13

Auswaschung von Ammoniumstickstoff beim Boden "Darmstadtneutral" (1.3.69 - 20.4.69)

Säule	Düngung	Zeitraum $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg)
1/2	Ungedüngt	1. Dekade 0,14 2. " 0,04 3. " 0,04 4. " 0,04 5. " 0,06 Gesamt 0,32	7/8	P_2O_5 N (NN) 14 mg P_2O_5 21 mg N	1. Dekade 0,19 2. " 0,07 3. " 0,04 4. " 0,04 5. " 0,09 Gesamt 0,43	13/14	P_2O_5 N (AS) K_2O 14 mg P_2O_5 21 mg N 28 mg K_2O	1. Dekade 0,24 2. " 0,14 3. " 0,08 4. " 0,04 5. " 0,05 Gesamt 0,55
3/4	P_2O_5 14 mg P_2O_5	1. Dekade 0,19 2. " 0,05 3. " 0,04 4. " 0,03 5. " 0,03 Gesamt 0,34	9/10	P_2O_5 N (KS) 14 mg P_2O_5 21 mg N	1. Dekade 0,17 2. " 0,06 3. " 0,01 4. " 0,03 5. " 0,11 Gesamt 0,38	15/16	P_2O_5 N (NN) K_2O 14 mg P_2O_5 21 mg N 28 mg K_2O	1. Dekade 0,22 2. " 0,10 3. " 0,08 4. " 0,03 5. " 0,03 Gesamt 0,46
5/6	P_2O_5 N (NS) 14 mg P_2O_5 21 mg N	1. Dekade 0,27 2. " 0,09 3. " 0,08 4. " 0,05 5. " 0,02 Gesamt 0,51	11/12	P_2O_5 K_2O 14 mg P_2O_5 28 mg K_2O	1. Dekade 0,16 2. " 0,04 3. " 0,08 4. " 0,04 5. " 0,05 Gesamt 0,38	17/18	P_2O_5 N (KS) K_2O 14 mg P_2O_5 21 mg N 28 mg K_2O	1. Dekade 0,18 2. " 0,09 3. " 0,05 4. " 0,05 5. " 0,01 Gesamt 0,38

Im Durchschnitt aller Varianten für die einzelnen Böden ergaben sich folgende Mittelwerte:

saurer Sandboden (Obertsh.I)	0,97 mg
aufgekalkter Sandboden (Obertsh.II)	1,10 mg
neutraler Sandboden (Darmstadt)	0,41 mg
saurer Leimboden (Lich)	0,51 mg

Die Ergebnisse lassen erkennen, daß die höchste $\text{NH}_4\text{-N}$ -Auswaschung unter den vorliegenden Versuchsbedingungen bei den Böden Obertshausen II, Obertshausen I und die niedrigste $\text{NH}_4\text{-N}$ -Auswaschung bei den Böden Lich und Darmstadt liegt. Absolut gesehen waren die Unterschiede aber gering.

In Tabelle 14 sind die Auswaschungsverluste an $\text{NH}_4\text{-N}$ in kg/ha ausgedrückt. Betrachtet man die Varianten 3 und 4 bzw. 7 und 8, so fällt auf, daß nur ein Bruchteil des mit der Düngung zugeführten Ammoniakstickstoffes zur Auswaschung kam. Die in diesen Varianten gefundenen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Verluste sind etwas höher als die in den nicht mit Stickstoff bzw. mit Calciumnitrat gedüngten Varianten. Inwieweit diese Differenzen auf die Nitrifikation oder eine sorptive Bindung des $\text{NH}_4\text{-N}$ zurückzuführen sind, sind im Kapitel Verlagerung noch weiter zu diskutieren.

Die relativ hohe $\text{NH}_4\text{-N}$ -Auswaschung aus dem Boden Obertshausen I ist zunächst darauf zurückzuführen, daß dieser Boden ein ausgesprochener Sandboden ist und dessen Sorptionskapazität gering ist. Ferner besitzt er mit einem N-Gehalt von 0,0679 % N fast den doppelt so hohen N-Gehalt wie der Boden Darmstadt.

Mit einer Erhöhung des pH-Wertes im Boden nimmt auch die Löslichkeit der meisten Nährstoffe zu.

Tabelle 14

Gesamtauswaschung von Ammoniumstickstoff
(kg $\text{NH}_4\text{-N/ha}$) in 50 Tagen bei 4 Versuchsböden

	Lehmboden sauer (Lich)	Sandboden sauer (Oberts- hausen I)	Sandboden aufgekalkt (Oberts- hausen II)	Sandboden neutral (Darmstadt)
1. Ungedüngt	5,1	11,7	13,4	4,5
2. 200 kg/ha P_2O_5 als Monocalciumphosphat	5,3	11,5	13,4	4,8
3. 200 kg/ha P_2O_5 300 kg/ha N (AS)	8,3	16,0	18,2	7,2
4. 200 kg/ha P_2O_5 300 kg/ha N (AN)	8,1	15,4	17,7	6,1
5. 200 kg/ha P_2O_5 300 kg/ha N (KS)	5,4	11,7	13,4	5,1
6. 200 kg/ha P_2O_5 400 kg/ha K_2O als Kaliumchlorid	7,0	12,2	14,1	5,4
7. 200 kg/ha P_2O_5 400 kg/ha K_2O 300 kg/ha N (AS)	10,2	17,1	19,4	7,8
8. 200 kg/ha P_2O_5 400 kg/ha K_2O 300 kg/ha N (AN)	9,7	16,2	18,1	6,6
9. 200 kg/ha P_2O_5 400 kg/ha K_2O 300 kg/ha N (KS)	7,1	12,4	14,1	5,4

Dies gilt zumindest für den Ammoniumstickstoff. Die Aufkalkung des sauren Bodens Obertshausen I (pH 4,6) auf pH 7,5 rief eine Erhöhung der NH_4 -Auswaschung hervor.

Die zusätzliche Kaliumdüngung hatte auf allen Böden - mit Ausnahme einiger Varianten des Bodens Obertshausen I - eine leicht erhöhte NH_4 -Auswaschung zur Folge.

Die Phosphatdüngung dagegen zeigte keinen sicheren Einfluß.

b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse

1. Die Versuchsergebnisse lassen zwar eine Auswaschung von Ammoniakstickstoff im Sickerwasser aller Böden erkennen, sie ist jedoch sehr gering und für die praktische Landwirtschaft ohne Bedeutung.
2. Mehr als die Hälfte der ausgewaschenen NH_4 -N-Menge fällt bei allen Böden in die erste und zweite Dekade.
3. Trotz der geringen NH_4 -N-Verluste wird deutlich, daß die höchste NH_4 -N-Auswaschung stets aus den mit schwefelsaurem Ammoniak gedüngten Varianten erfolgt. Danach folgen die mit Ammoniumnitrat gedüngten Varianten, während die NH_4 -Verluste bei den mit Calciumnitrat behandelten am niedrigsten sind und denen der nicht mit N gedüngten Varianten gleichen.
4. Die Erhöhung des pH-Wertes des Obertshausener Bodens von pH 4,6 auf pH 7,5 hatte eine leicht erhöhte NH_4 -N-Auswaschung zur Folge.

5. Bei der Höhe der NH_4 -N-Auswaschung spielt die Sorptionskapazität bzw. das N-Nachlieferungsvermögen eines Bodens eine wichtige Rolle. Deshalb sind die Auswaschungswerte des Bodens Darmstadt ähnlich bzw. gleich.
6. Kaliumdüngung bewirkte eine leichte Erhöhung der NH_4 -Auswaschung.
7. Die Düngung mit Monocalciumphosphat hatte keinen Einfluß auf die NH_4 -Auswaschung.

3. Auswaschung der Phosphorsäure

a. Versuchsergebnisse und Diskussion

Die Untersuchung des Sickerwassers auf Phosphat ergab die in den Tabellen 16, 17, 18 und 19 zusammengestellten Ergebnisse.

Die Analysenwerte zeigen, daß auf jedem Boden durchaus meßbare Mengen an Phosphorsäure ausgewaschen wurden. Sie sind allerdings sehr gering.

Zeitlicher Verlauf der P_2O_5 -Auswaschung

Obwohl die ausgewaschenen P_2O_5 -Mengen gering und für die praktische Landwirtschaft ohne Bedeutung sind, wird hier der zeitliche Verlauf der P_2O_5 -Auswaschung beschrieben, um auf die graduellen Unterschiede unter den Böden im Hinblick auf Phosphorsäureauswaschung Hinweise zu geben.

Bei dem Lehm Boden Lich (Tabelle 16) waren die Auswaschungsverluste an P_2O_5 zu Beginn des Versuches und bei der zweiten Probeentnahme etwa gleich. Bei den weiteren Probenahmen sanken diese Werte deutlich ab ohne sichere Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten.

Tabelle 16

Auswaschung von Phosphorsäure beim Boden "Lich" (21.2.68 - 2.4.68)

Säule	Düngung	Zeitraum	P ₂ O ₅ (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum	P ₂ O ₅ (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum	P ₂ O ₅ (mg)
1/2	Ungedüngt	1. Dekade	0,02	7/8	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,03	13/14	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,02
		2. "	0,01		N (NN)	2. "	0,01		N (NS)	2. "	0,03
		3. "	0,01		14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,01		K ₂ O	3. "	0,01
		4. "	0,01		21 mg N	4. "	0,01		14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,01
		5. "	0,01			5. "	0,01		21 mg N	5. "	0,01
		Gesamt	0,06			Gesamt	0,07		28 mg K ₂ O	Gesamt	0,08
3/4	P ₂ O ₅ 14 mg P ₂ O ₅	1. Dekade	0,02	9/10	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,03	15/16	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,02
		2. "	0,02		N (KS)	2. "	0,01		NN (N)	2. "	0,03
		3. "	0,01		14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,01		K ₂ O	3. "	0,01
		4. "	0,03		21 mg N	4. "	0,01		14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,01
		5. "	0,01			5. "	0,01		21 mg N	5. "	0,01
		Gesamt	0,02			Gesamt	0,07		28 mg K ₂ O	Gesamt	0,08
5/6	P ₂ O ₅ N (NS) 14 mg P ₂ O ₅ 21 mg N	1. Dekade	0,02	11/12	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,03	17/18	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,02
		2. "	0,02		N (KS)	2. "	0,01		N (KS)	2. "	0,02
		3. "	0,01		14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,01		K ₂ O	3. "	0,02
		4. "	0,01		28 mg K ₂ O	4. "	0,01		14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,01
		5. "	0,01			5. "	0,01		21 mg N	5. "	0,01
		Gesamt	0,07			Gesamt	0,08		28 mg K ₂ O	Gesamt	0,08

Ob die leicht erhöhte Phosphatauswaschung in Variante 2 (alleinige P-Düngung) real ist, bleibt dahingestellt.

Im Sickerwasser des sauren Bodens Obersthausen I (Tabelle 17) konnte nach der 1. Dekade kein Phosphat nachgewiesen werden, während sich im Sickerwasser der zweiten Probenahme geringe Phosphorsäuremengen vorfanden. Ein leichter Anstieg zeichnet sich bei allen Varianten in der dritten Probeentnahme ab und auch bei der vierten Probenahme. Die Auswaschungsverluste nahmen leicht zu. Bei der fünften Probeentnahme dagegen trat wieder eine Abnahme der P_2O_5 -Werte ein.

Bei dem aufgekalkten Obertshausen II (Tabelle 18) wurde fast die Hälfte der während des Versuches ausgewaschenen P_2O_5 -Mengen in der ersten Probeentnahme ermittelt. Zu den folgenden Dekaden nahmen die Auswaschungsverluste für Phosphat kontinuierlich ab.

Bei der ersten Probeentnahme traten bei dem Boden Darmstadt (Tabelle 19) geringe P_2O_5 -Verluste ein, während sich im Sickerwasser der zweiten Probeentnahme, und zwar in allen Varianten, ein Anstieg abzeichnete. Eine Abnahme an P_2O_5 -Auswaschung trat bei der dritten Probeentnahme ein. Im Sickerwasser aller Bodensäulen zeichnete sich ein Anstieg der P_2O_5 -Werte ab, um in der fünften Probenahme dann wieder abzunehmen.

Die Auswaschung der Boden- und Düngerphosphorsäure

Es wurden die am Versuchsende aus den verschiedenen Böden ausgewaschenen P_2O_5 -Mengen in der Tabelle 20, Seite 55 zusammengestellt. Aus diesen Zahlen geht hervor, daß auf allen Böden Phosphorsäure in erster Linie aus dem Bodenvorrat ausgewaschen wurde und daß der Anteil der Düngerphosphorsäure (als Monocalciumphosphat verabreicht) an der Auswaschung gering war.

Tabelle 17

Auswaschung von Phosphorsäure beim Boden "Obertshausensauer (7.2.68 - 16.1.69)

Säule Düngung	Zeitraum	P ₂ O ₅ (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	P ₂ O ₅ (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	P ₂ O ₅ (mg)
1/2 Ungedüngt	1. Dekade	-	7/8 P ₂ O ₅	1. Dekade	-	13/14 P ₂ O ₅	1. Dekade	-
	2. "	0,01	N (NN)	2. "	0,01	N (NS)	2. "	0,01
	3. "	0,02	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,03	K ₂ O	3. "	0,06
	4. "	0,06	21 mg N	4. "	0,06	14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,06
	5. "	0,01		5. "	0,03	21 mg N	5. "	0,04
	Gesamt	0,10		Gesamt	0,13	23 mg K ₂ O	Gesamt	0,17
3/4 P ₂ O ₅	1. Dekade	-	9/10 P ₂ O ₅	1. Dekade	-	15/16 P ₂ O ₅	1. Dekade	-
14 mg P ₂ O ₅	2. "	0,01	N (KS)	2. "	0,02	NN (N)	2. "	0,03
	3. "	0,02	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,03	K ₂ O	3. "	0,04
	4. "	0,07	21 mg N	4. "	0,05	14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,06
	5. "	0,02		5. "	0,02	21 mg N	5. "	0,02
	Gesamt	0,12		Gesamt	0,12	23 mg K ₂ O	Gesamt	0,12
5/6 P ₂ O ₅	1. Dekade	-	11/12 P ₂ O ₅	1. Dekade	-	17/18 P ₂ O ₅	1. Dekade	-
N (NS)	2. "	0,01	K ₂ O	2. "	0,01	N (NS)	2. "	0,03
14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,02	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,02	K ₂ O	3. "	0,03
21 mg N	4. "	0,07	28 mg K ₂ O	4. "	0,06	14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,03
	5. "	0,03		5. "	0,03	21 mg N	5. "	0,03
	Gesamt	0,16		Gesamt	0,12	28 mg K ₂ O	Gesamt	0,14

Tabelle 18

Auswaschung von Phosphorsäure beim Boden "Obersthausenaufgekalkt" (24.5.69-3.7.69)

Säule Düngung	Zeitraum	P ₂ O ₅ (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	P ₂ O ₅ (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	P ₂ O ₅ (mg)
1/2 Ungedüngt	1. Dekade	0,05	7/8 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,06	13/14 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,06
	2. "	0,04	N (NN)	2. "	0,05	N (NS)	2. "	0,04
	3. "	0,01	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,02	K ₂ O	3. "	0,02
	4. "	-	21 mg N	4. "	0,02	14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,01
	5. "	-		5. "	0,01	21 mg N	5. "	0,01
	Gesamt	0,10		Gesamt	0,16	28 mg K ₂ O	Gesamt	0,14
3/4 P ₂ O ₅ 14 mg P ₂ O ₅	1. Dekade	0,07	9/10 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,06	15/16 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,04
	2. "	0,01	N (KS)	2. "	0,07	NN (N)	2. "	0,05
	3. "	0,03	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,02	K ₂ O	3. "	0,03
	4. "	0,02	21 mg N	4. "	0,01	14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,01
	5. "	0,01		5. "	0,01	21 mg N	5. "	0,01
	Gesamt	0,14		Gesamt	0,17	28 mg K ₂ O	Gesamt	0,14
5/6 P ₂ O ₅ N (NS)	1. Dekade	0,07	11/12 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,04	17/18 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,05
	2. "	0,05	K ₂ O	2. "	0,04	N (KS)	2. "	0,04
	3. "	0,02	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,02	K ₂ O	3. "	0,02
	4. "	0,02	28 mg K ₂ O	4. "	0,01	14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,02
	5. "	0,01		5. "	0,01	21 mg N	5. "	0,02
	Gesamt	0,17		Gesamt	0,12	28 mg K ₂ O	Gesamt	0,14

Tabelle 12

Auswaschung von Phosphorsäure beim Boden "Darmstadtneutral" (1.3.69 - 20.4.69)

Säule	Düngung	Zeitraum	P ₂ O ₅ (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum	P ₂ O ₅ (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum	P ₂ O ₅ (mg)
1/2	Ungedüngt	1. Dekade	0,01	7/8	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,02	13/14	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,03
		2. "	0,04		N (NN)	2. "	0,03		N (NS)	2. "	0,04
		3. "	0,01		14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,02		K ₂ O	3. "	0,02
		4. "	0,02		21 mg N	4. "	0,02		14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,02
		5. "	0,01			5. "	0,02		21 mg N	5. "	0,01
		Gesamt	0,09			Gesamt	0,11		28 mg K ₂ O	Gesamt	0,12
3/4	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,03	9/10	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,02	15/16	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,03
	14 mg P ₂ O ₅	2. "	0,04		N (KS)	2. "	0,02		NN (N)	2. "	0,03
		3. "	0,02		14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,02		K ₂ O	3. "	0,02
		4. "	0,03		21 mg N	4. "	0,03		14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,02
		5. "	0,01			5. "	0,01		21 mg N	5. "	0,01
		Gesamt	0,13			Gesamt	0,10		28 mg K ₂ O	Gesamt	0,11
5/6	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,02	11/12	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,03	17/18	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,03
	N (NJ)	2. "	0,04		K ₂ O	2. "	0,04		N (KS)	2. "	0,03
	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,02		14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,02		K ₂ O	3. "	0,02
	21 mg N	4. "	0,02		28 mg K ₂ O	4. "	0,02		14 mg P ₂ O ₅	4. "	0,02
		5. "	0,01			5. "	0,01		21 mg N	5. "	0,01
		Gesamt	0,11			Gesamt	0,12		28 mg K ₂ O	Gesamt	0,11

Tabelle 20

Gesamtauswaschung von Phosphorsäure (kg P_2O_5 /ha)
in 50 Tagen bei 4 Versuchsböden

	Lehmboden sauer (Lich)	Sandboden sauer (Obertsh.I)	Sandboden aufgekalkt (Obertsh.II)	Sandboden neutral (Darmst.)
1. Ungedüngt	0,8	1,4	1,4	1,3
2. 200 kg/ha P_2O_5 als Monocalciumphosphat	1,3	1,7	2,0	1,9
3. 200 kg P_2O_5 300 kg/ha N (AS)	1,1	2,2	2,4	1,6
4. 200 kg/ha P_2O_5 300 kg/ha N (AN)	1,1	1,8	2,2	1,6
5. 200 kg/ha P_2O_5 300 kg/ha N (KS)	1,1	1,7	2,4	1,5
6. 200 kg/ha P_2O_5 400 kg/ha K_2O als Kaliumchlorid	1,1	1,7	1,7	1,8
7. 200 kg/ha P_2O_5 400 kg/ha K_2O 300 kg/ha N (AS)	1,1	2,4	2,0	1,8
8. 200 kg/ha P_2O_5 400 kg/ha K_2O 300 kg/ha N (AN)	1,1	2,1	2,0	1,6
9. 200 kg/ha P_2O_5 400 kg/ha K_2O 300 kg/ha N (KS)	1,1	2,0	2,0	1,6

Bekanntlich geht die dem Boden als Düngemittel zugeführte Phosphorsäure vorwiegend in anorganische Verbindungen über und wird dadurch fixiert. Die in der Tabelle 20 zusammengestellten Daten führen ferner zu dem Ergebnis, daß aus den Sandböden Obertshausen I und II und dem neutralen Boden Darmstadt etwas größere Mengen an P_2O_5 ausgewaschen werden als aus dem Lehm-boden Lich, obwohl letzterer Boden von allen Versuchsböden den höchsten P_2O_5 -Gehalt (22,78 mg P_2O_5 /100 g Bod.) aufweist. Auf dem Boden Lich mit seinem hohen Tongehalt und seiner niedrigen Bodenreaktion hat wahrscheinlich die Anionensorption eine Rolle gespielt und die Auswaschung niedrig gehalten.

Zusammenfassend wurde aus dem sauren Boden Obertshausen I etwa gleichviel Phosphorsäure ausgewaschen wie aus demselben aufgekalkten Boden Obertshausen II. Es folgt der neutrale Sandboden Darmstadt, während die geringste P_2O_5 -Auswaschung aus dem sauren Lehm-boden Lich erfolgte.

Die Aufkalkung des sauren Sandbodens Obertshausen I von pH 4,6 auf pH 7,5 brachte keine konkreten Ergebnisse.

b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse

1. Im Sickerwasser aller Böden konnten meßbare Mengen an Phosphorsäure gemessen werden, die jedoch gering sind.
2. Die Versuche führten ferner zu dem Ergebnis, daß vorwiegend bodeneigene Phosphorsäure ausgewaschen wurde. Der Anteil der Düngerphosphorsäure an der P_2O_5 -Auswaschung war dagegen sehr gering.
3. Bei der P_2O_5 -Auswaschung spielen pH-Wert und Tongehalt eines Bodens eine wichtige Rolle. So wurde

aus allen drei Sandböden mehr P_2O_5 ausgewaschen als aus dem Lehm Boden Lich, obwohl dieser den höchsten P_2O_5 -Gehalt aufweist.

4. Die Aufkalkung eines Bodens beeinflusste geringfügig den zeitlichen Verlauf der P_2O_5 -Auswaschung, jedoch nicht dessen absolute Höhe. So war die gesamte P_2O_5 -Auswaschung am Versuchsende bei dem aufgekalkten und nicht aufgekalkten Sandboden etwa gleich.
5. Stickstoff- und Kaliumdüngung bewirkten keine gesicherte Veränderung der P_2O_5 -Auswaschung.

4. Auswaschung von Kalium

In den Sickerwässern wurde ferner die Kaliumauswaschung untersucht, wobei das Kalium flammenfotometrisch gemessen wurde.

a) V Versuchsergebnisse und Diskussion

Die hinsichtlich der Kaliumauswaschung gewonnenen Ergebnisse sind in den Tabellen 21, 22, 23 und 24 zusammengestellt. Sie zeigen, daß die Auswaschungswerte an Kalium nicht voll mit den in der Literatur angegebenen Werten übereinstimmen. Es muß berücksichtigt werden, daß die meisten Versuche anderer Autoren auf Bodenschichten von 1 m und mehr bei Bepflanzung und mit niedrigerer Düngung durchgeführt wurden. Die Versuche bei der vorliegenden Arbeit wurden jedoch bei einer 40-cm Bodenschicht ohne Pflanzen und mit einer Düngergabe von 400 kg/ha K_2O durchgeführt, weshalb auch die K_2O -Verluste höher liegen. Hinzu kommt, daß bei der vorliegenden Versuchsanstellung Wasserverluste durch Evaporation kaum auftreten konnten und das aufgegebene Wasser in überwiegendem Maße ausgetreten ist.

Die Analysenwerte der 1. Dekade des Lehmbodens Lich (Tabelle 21) sind unterschiedlich. Die Varianten 1 und 2 haben die niedrigste K_2O -Auswaschung, während die mit den einzelnen N-Düngern gedüngten Varianten bis auf die Variante 5 eine etwas höhere K_2O -Auswaschung aufweisen. Die Varianten mit Kalium, sowohl ohne als auch mit N-Düngern zusammen zeigen die höchsten K-Verluste.

Bei der zweiten Probenahme steigen die K_2O -Werte in den ersten fünf Varianten (von 1 bis 5) etwas an. Dagegen wurden bei der mit Kalium gedüngten Varianten und ihren Kombinationen mit N-Düngern eine geringe Abnahme festgestellt.

Diese Abnahme der K_2O -Werte setzte sich bei der dritten Dekade in allen Varianten fort. Hierbei fällt auf, daß die K_2O -Werte der Varianten 7 und 8 höher liegen als die bei den Varianten 6 und 9. Bei der vierten Dekade stiegen die K_2O -Verluste in allen Varianten wieder etwas an. Bei der fünften Probenahme dagegen erfolgte wieder ein leichter Abfall.

Auch bei dem sauren Boden Obersthausen I (Tabelle 22) machte sich die Kaliumdüngung bereits in der ersten Dekade deutlich bemerkbar: Die Auswaschung bei den Varianten ohne Kalium (Variante 1 bis 5) betrug etwa $1/4$ der Menge wie bei den mit Kalium gedüngten Varianten.

In der zweiten Dekade nahmen die K_2O -Verluste der Varianten 1 und 2 ab, während sie bei den übrigen Varianten zunahmen, insbesondere bei den Varianten 6 - 9 (mit K-Düngung). Die absolut höchste K_2O -Auswaschung war bei Variante 7 zu verzeichnen. In den Dekaden 3 und 4 nahmen die K_2O -Werte überall kontinuierlich ab, um bei der 5. Dekade in allen Varianten wieder deutlich zuzunehmen.

Tabelle 21

Auswaschung von Kalium beim Boden "Lich" (21. 2. 68 - 2. 4. 68)

Säule Düngung	Zeitraum	K ₂ O (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	K ₂ O (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	K ₂ O (mg)
1/2 Ungedüngt	1. Dekade	0,38	7/8 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,56	13/14 P ₂ O ₅	1. Dekade	2,77
	2. "	0,52	N (AN)	2. "	0,54	N (AS)	2. "	2,40
	3. "	0,25	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,22	K ₂ O	3. "	1,50
	4. "	0,37	21 mg N	4. "	0,37	14 mg P ₂ O ₅ 21 mg N	4. "	1,73
	5. "	0,23		5. "	0,20	28 mg K ₂ O	5. "	1,19
	Gesamt	1,75		Gesamt	1,75		Gesamt	9,59
3/4 P ₂ O ₅ 14 mg P ₂ O ₅	1. Dekade	0,39	9/10 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,40	15/16 P ₂ O ₅	1. Dekade	2,69
	2. "	0,54	N (KS)	2. "	0,54	N (AN)	2. "	2,10
	3. "	0,22	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,22	K ₂ O	3. "	1,56
	4. "	0,37	21 mg N	4. "	0,35	14 mg P ₂ O ₅ 21 mg N	4. "	1,88
	5. "	0,23		5. "	0,24	28 mg K ₂ O	5. "	1,01
	Gesamt	1,75		Gesamt	1,75		Gesamt	9,24
5/6 P ₂ O ₅ N (AS) 14 mg P ₂ O ₅ 21 mg N	1. Dekade	0,57	11/12 P ₂ O ₅	1. Dekade	2,69	17/18 P ₂ O ₅	1. Dekade	2,52
	2. "	0,57	K ₂ O	2. "	2,33	K (KS)	2. "	2,40
	3. "	0,29	14 mg P ₂ O ₅	3. "	1,26	K ₂ O	3. "	1,23
	4. "	0,37	28 mg K ₂ O	4. "	1,68	14 mg P ₂ O ₅ 21 mg N	4. "	1,80
	5. "	0,23		5. "	1,07	28 mg K ₂ O	5. "	1,08
	Gesamt	2,03		Gesamt	9,03		Gesamt	9,03

Tabelle 22

Auswaschung von Kalium beim Boden "Obertshausensauer" (7.12.68 - 16.1.69)

Säule Düngung	Zeitraum	K ₂ O (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	K ₂ O (mg)	Säule Düngung	Zeitraum	K ₂ O (mg)
1/2 Ungedüngt	1. Dekade	0,71	7/8 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,62	13/14 P ₂ O ₅	1. Dekade	2,44
	2. "	0,49	N (AN)	2. "	0,70	N (AS)	2. "	3,80
	3. "	0,32	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,31	K ₂ O	3. "	2,26
	4. "	0,35	21 mg N	4. "	0,34	14 mg P ₂ O ₅	4. "	1,34
	5. "	0,44		5. "	0,48	21 mg N	5. "	2,20
	Gesamt	2,31		Gesamt	2,45	28 mg K ₂ O	Gesamt	12,04
3/4 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,74	9/10 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,52	14/16 P ₂ O ₅	1. Dekade	2,39
14 mg P ₂ O ₅	2. "	0,56	N (KS)	2. "	0,77	N (AN)	2. "	2,98
	3. "	0,32	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,30	K ₂ O	3. "	2,57
	4. "	0,25	21 mg N	4. "	0,26	14 mg P ₂ O ₅	4. "	1,56
	5. "	0,44		5. "	0,46	21 mg N	5. "	2,27
	Gesamt	2,31		Gesamt	2,31	28 mg K ₂ O	Gesamt	11,77
5/6 P ₂ O ₅	1. Dekade	0,64	11/12 P ₂ O ₅	1. Dekade	2,30	17/18 P ₂ O ₅	1. Dekade	2,40
N (AS)	2. "	0,76	K ₂ O	2. "	3,44	N (KS)	2. "	3,10
14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,32	14 mg P ₂ O ₅	3. "	2,18	K ₂ O	3. "	2,20
21 mg N	4. "	0,29	28 mg K ₂ O	4. "	1,26	14 mg P ₂ O ₅	4. "	1,94
	5. "	0,65		5. "	2,32	21 mg N	5. "	1,86
	Gesamt	2,66		Gesamt	11,50	28 mg K ₂ O	Gesamt	11,20

Im Sickerwasser aller Varianten des aufgekalkten Bodens Obertshausen II (Tabelle 23) wurden bei der ersten Probenahme etwas höhere K_2O -Werte ermittelt als bei dem sauren Boden Obertshausen.

Die zweite Probenahme zeigte in den Varianten 1 bis 5 (ohne K_2O) einen leichten Abfall der K_2O -Werte, während bei den mit Kalium gedüngten Varianten (6 bis 9) die K_2O -Auswaschung weiterhin zunahm.

Bei den weiteren Dekaden verringerte sich die K_2O -Auswaschung fortlaufend.

Bei dem neutralen Boden Darmstadt (Tabelle 24) wurde in allen Varianten die höchste K_2O -Auswaschung bei der ersten Dekade ermittelt, besonders bei den mit Kalium gedüngten Varianten, sowohl ohne als auch zusammen mit verschiedenen N-Düngern.

In der zweiten Dekade ergab sich ganz allgemein, in allen Varianten, eine niedrigere K_2O -Auswaschung als in der ersten Dekade.

Trotz dieser Abnahme sind die K_2O -Verluste bei den mit Kalium gedüngten Varianten noch beträchtlich. Es fällt auf, daß in der ersten und zweiten Dekade die höchste K_2O -Auswaschung bei den Varianten 6 und 7 stattfand, gefolgt von Varianten 8 und 9. In den folgenden Dekaden nahmen die Auswaschungsverluste ständig ab.

In Tabelle 25 sind die je Säule eingetretenen Verluste in kg/ha umgerechnet. Die Ergebnisse zeigen, daß die Auswaschungsverluste bei den einzelnen Böden unterschiedlich und relativ hoch sind.

Wie nicht anders zu erwarten, wurde die höchste K_2O -Auswaschung bei den K-Varianten (6 bis 9) mit und ohne N-Düngung ermittelt.

Tabelle 23

Auswaschung von Kalium beim Boden "Obertshausenaufgekalkt" (24.5.69 - 3.7.69)

Säule	Düngung	Zeitraum	K ₂ O (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum	K ₂ O (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum	K ₂ O (mg)
1/2	Ungedüngt	1. Dekade	1,00	7/8	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,98	13/14	P ₂ O ₅	1. Dekade	4,48
		2. "	0,74		N (AN)	2. "	0,92		N (AS)	2. "	5,44
		3. "	0,33		14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,50		K ₂ O	3. "	3,26
		4. "	0,24		21 mg N	4. "	0,20		14 mg P ₂ O ₅ 21 mg N	4. "	1,58
		5. "	0,24			5. "	0,17		28 mg K ₂ O	5. "	0,95
		Gesamt	2,59			Gesamt	2,77			Gesamt	15,75
3/4	P ₂ O ₅	1. Dekade	1,00	9/10	P ₂ O ₅	1. Dekade	0,98	15/16	P ₂ O ₅	1. Dekade	3,98
	14 mg P ₂ O ₅	2. "	0,83		N (KS)	2. "	0,77		N (AN)	2. "	4,75
		3. "	0,26		14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,43		K ₂ O	3. "	3,68
		4. "	0,26		21 mg N	4. "	0,23		14 mg P ₂ O ₅ 21 mg N	4. "	1,83
		5. "	0,17			5. "	0,18		28 mg K ₂ O	5. "	1,23
		Gesamt	2,58			Gesamt	2,59			Gesamt	15,47
5/6	P ₂ O ₅	1. Dekade	1,00	11/12	P ₂ O ₅	1. Dekade	4,34	17/18	P ₂ O ₅	1. Dekade	3,96
	N (AS)	2. "	0,95		K ₂ O	2. "	4,77		N (KS)	2. "	4,23
	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,62		14 mg P ₂ O ₅	3. "	2,66		K ₂ O	3. "	3,02
	21 mg N	4. "	0,21		28 mg K ₂ O	4. "	1,70		14 mg P ₂ O ₅ 21 mg N	4. "	2,03
		5. "	0,23			5. "	1,72		28 mg K ₂ O	5. "	1,92
		Gesamt	3,01			Gesamt	15,19			Gesamt	15,19

Tabelle 24

Auswaschung von Kalium beim Boden "Darmstadtneutral" (1.3.69 - 20.4.69)

Säule	Düngung	Zeitraum	K ₂ O (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum	K ₂ O (mg)	Säule	Düngung	Zeitraum	K ₂ O (mg)
1/2	Ungedüngt	1. Dekade	1,07	7/8	P ₂ O ₅	1. Dekade	1,12	13/14	P ₂ O ₅	1. Dekade	4,84
		2. "	0,32		N (AN)	2. "	0,41		N (AS)	2. "	3,45
		3. "	0,29		14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,34		K ₂ O	3. "	2,23
		4. "	0,14		21 mg N	4. "	0,16		14 mg P ₂ O ₅	4. "	1,86
		5. "	0,14			5. "	0,14		21 mg N	5. "	0,92
		Gesamt	1,96			Gesamt	2,17		28 mg K ₂ O	Gesamt	13,30
3/4	P ₂ O ₅	1. Dekade	1,08	9/10	P ₂ O ₅	1. Dekade	1,07	15/16	P ₂ O ₅	1. Dekade	4,18
	14 mg P ₂ O ₅	2. "	0,31		N (KS)	2. "	0,35		N (AN)	2. "	3,25
		3. "	0,29		14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,26		K ₂ O	3. "	2,36
		4. "	0,14		21 mg N	4. "	0,14		14 mg P ₂ O ₅	4. "	2,20
		5. "	0,14			5. "	0,14		21 mg N	5. "	0,89
		Gesamt	1,96			Gesamt	1,96		28 mg K ₂ O	Gesamt	12,88
6/6	P ₂ O ₅	1. Dekade	1,72	11/12	P ₂ O ₅	1. Dekade	4,40	17/18	P ₂ O ₅	1. Dekade	3,99
	N (AS)	2. "	0,48		K ₂ O	2. "	3,06		N (KS)	2. "	3,21
	14 mg P ₂ O ₅	3. "	0,41		14 mg P ₂ O ₅	3. "	2,28		K ₂ O	3. "	2,39
	21 mg N	4. "	0,13		28 mg K ₂ O	4. "	1,98		14 mg P ₂ O ₅	4. "	2,13
		5. "	0,12			5. "	0,88		21 mg N	5. "	0,88
		Gesamt	2,31			Gesamt	12,60		28 mg K ₂ O	Gesamt	12,60

Tabelle 25

Gesamtauswaschung von Kalium ($\text{kg K}_2\text{O} / \text{ha}$)

in 50 Tagen bei 4 Versuchsböden

	Lehmboden sauer (Lich)	Sandboden sauer (Obertsh.I)	Sandboden aufgekalkt (Obertsh.II)	Sandboden neutral (Darmstadt)
Ungedüngt	25,0	33,0	37,0	28,0
200 kg/ha P_2O_5 als Monocalciumphosphat	25,0	33,0	37,0	28,0
200 kg/ha P_2O_5 300 kg/ha N (AS)	29,0	38,0	43,0	33,0
200 kg/ha P_2O_5 300 kg/ha N (AN)	27,0	35,0	39,5	31,0
200 kg/ha P_2O_5 300 kg/ha N (KS)	25,0	33,0	37,0	28,0
200 kg/ha P_2O_5 400 kg/ha K_2O als Kaliumchlorid	129,0	164,0	217,0	180,0
200 kg/ha P_2O_5 400 kg/ha K_2O 300 kg/ha N (AS)	137,0	172,0	225,0	190,0
200 kg/ha P_2O_5 400 kg/ha K_2O 300 kg/ha N (AN)	132,0	168,0	221,0	184,0
200 kg/ha P_2O_5 400 kg/ha K_2O 300 kg/ha N (KS)	129,0	164,0	217,0	180,0

Die Phosphatdüngung in Variante 2 veränderte die K_2O -Auswaschung in keinem der vier Versuchsböden, die bei dem sauren Boden Obertshausen I 33 kg/ha betrug und durch die Aufkalkung auf 37 kg/ha erhöht wurde. Ähnliche Beobachtung machten auch KÖHNLEIN und Mitarbeiter (1966) und fanden auf einem sandigen Lehm und humosem Sand statistisch gesicherte höhere K_2O -Auswaschung.

Kalksalpeter (Variante 5) veränderte die K_2O -Auswaschung nicht, wohl aber die NH_4 -haltigen Düngemittel, insbesondere schwefelsaures Ammoniak in Variante 3. Die gleiche Wirkung der ammoniumsulfathaltigen Düngemittel trat auch bei K-Düngung ein. Schwefelsaures Ammoniak in Variante 7 erhöhte die Kaliumauswaschung auf dem Boden Darmstadt um 10 kg/ha, bei den übrigen Böden war die Wirkung geringer. Durch Ammoniumnitrat wurde die K_2O -Auswaschung ebenfalls geändert, aber weniger stark ausgeprägt.

Der Anteil des Düngerkaliums an der K_2O -Gesamtauswaschung ist in der Tabelle 26 zu entnehmen.

Die angegebenen Werte wurden errechnet aus den Differenzen der Varianten 6 - 2, 7 - 3, 8 - 4 und 9 - 5. Ob diese errechneten Werte den tatsächlichen Verhältnissen genau entsprechen, sei dahingestellt. Möglicherweise liegen in den Varianten 6 - 9 die Verluste an Dünger- K_2O höher, d.h. daß hier die Auswaschung des Boden-Kaliums niedriger war als in den entsprechenden Varianten ohne K-Düngung.

Tabelle 26

K₂O-Auswaschung
(in % des Düngerkaliums)

	Lehmboden (Lich) pH:5,7	Sandboden (Obertsh.I) pH:4,6	Sandboden (Obertsh.II) pH: 7,5	Sandboden (Darmst.) pH:7,5
Düngung kg/ha K ₂ O	400.0	400.0	400.0	400.0
Variante 6 P + K ₂ O	26,0	32,7	45,0	38,0
Variante 7 P + AS (N)	27,0	33,5	45,5	39,3
Variante 8 P + AN (N)	26,2	33,2	45,4	38,3
Variante 9 P + KS (N)	26,0	32,7	45,0	38,0

b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse

1. Die Auswaschungsversuche ergaben eine bei den Versuchsböden unterschiedliche, relativ hohe K₂O-Auswaschung.
2. Eine Phosphatdüngung veränderte die Auswaschung des bodeneigenen Kaliums nicht.
3. Die Aufkalkung eines sauren Bodens führte zu einer verstärkten K₂O-Auswaschung.
4. Die Auswaschung des Düngerkaliums schwankte je nach Bodenart zwischen 26 und 45 %.
5. Die Düngung mit Ammoniumstickstoff verstärkte die Auswaschung sowohl des Boden- als auch des Düngerkaliums. Dabei hatte Ammoniumsulfat auf Grund seines höheren Gehaltes an NH₄-N den stärksten Einfluß; entsprechend geringere Wirkung zeigte das Ammoniumnitrat, während Calciumnitrat keinen Einfluß auf die K₂O-Auswaschung erkennen ließ.

I. Verlagerung des Stickstoffs

Stickstoff im Boden ist verschiedenen Einflüssen ausgesetzt. Sie können biologischer und chemischer Natur sein. Durch ihr Zusammenwirken wird der Stickstoff im unterschiedlichen Maße umgesetzt (Mineralisation) bzw. festgelegt.

Die Mikrobentätigkeit spielt für die N-Mineralisation eine maßgebliche Rolle. Mikroben bedürfen für ihre Tätigkeit nicht nur Stickstoff und Kohlenstoff in einem ganz bestimmten Verhältnis, sondern auch andere Hauptnährelemente wie Phosphor und Kalium. Letztere sind im organischen bzw. anorganischen Teil des Bodens meistens genügend vorhanden, während für ein optimales C/N-Verhältnis vorgesorgt werden muß.

Die Mineralisationsrate hängt außerdem von chemischen und physikalischen Eigenschaften (z.B. Temperatur, Licht, Textur und WK- des Bodens) ab.

Durch Zusammenwirken aller obengenannten Faktoren ergeben sich unterschiedliche Mengen an Ammonium- und Nitrat-Stickstoff im Boden. Außerdem ist der N-Vorrat eines Bodensabhängig von: Zufuhr von Niederschlägen und Mikroorganismen, Entzügen durch die Pflanzen und Verlusten durch Auswaschung sowie durch Denitrifikation - Rückführung von N_2 in die Atmosphäre.

Dieser Fragenkomplex gibt Hinweise über den Verlauf des N-Kreislaufs und ist daher für die Versorgung der Kulturpflanzen sowie der Erhöhung ihrer Erträge von Bedeutung.

In dem nun folgenden Teil der Arbeit wurde die Verlagerung des mit der Düngung zugeführten NH_4 - und NO_3 -Stickstoffs untersucht, und zwar in den gleichen Bodensäulen, die bei den Auswaschungsversuchen verwendet worden waren. Aber auch die Beweglichkeit

der Phosphat- und Kaliumdüngung mit ihren Wechselwirkungen von Stickstoffdüngung wurden mit in die Untersuchungen einbezogen.

II. LITERATURÜBERBLICK

Der dem Boden zugeführten Stickstoff (organischer oder mineralischer Natur) wird durch Bodenmikroorganismen und unter Zusammenwirken der bereits eingangs erläuterten Faktoren umgesetzt bzw. mineralisiert (ZÖTTL, 1968).

Nitratstickstoff wandert in Begleitung des Wassers nach unten, während NH_4 -Stickstoff von den Ton-Humuskomplexen des Bodens festgehalten bzw. von den Tonmineralien fixiert wird.

Die Verlagerungsgeschwindigkeit des NO_3 -N wird vom Entzug durch die Pflanzen, der Textur des Bodens, der Höhe der Niederschläge sowie von der Temperatur und Luftfeuchtigkeit beeinflusst (LAMPE, 1962; KRETZSCHMAR, 1964).

RATHSACK (1939) beobachtete die Umsetzungen zweier N-Dünger auf verschiedenen Böden und stellte fest, daß die N-Düngung die Mineralisation des Bodenstickstoffs anregte bzw. erhöhte. Der gleiche Autor und ebenfalls ZÖTTL (1960) konnten jedoch keine weitere Wirkung von zusätzlichen N-Gaben feststellen, wenn der Mineralstickstoff schon angehäuft war.

KLAUB (1940) wies nach, daß der verabreichte NH_4 -N nach einem Tag nitrifiziert wurde. Auch er stellte einen höheren Gehalt an N, wie er auf Grund der N-Düngung zu erwarten gewesen wäre, fest, der aus der organischen Substanz durch Mineralisation verfügbar wurde.

TORSTENSSON (1943) führte Umsetzungsversuche bei der Vollbrache durch und ermittelte eine Anreicherung des Oberbodens von 5 mg N/100 g Boden, die auf die biologische Tätigkeit des Bodens zurückzuführen war.

JACOB und WIEGAND (1952) untersuchten die Verlagerung des Stickstoffs auf einem lehmigen Sandboden. In einem Profil von 40 cm Höhe wurden die beiden N-Formen (NO_3 und NH_4) in drei Tiefen ermittelt. Diese Profiluntersuchungen führten zum Ergebnis, daß der Gehalt an Ammoniumstickstoff fünf Wochen nach dem Ausstreuen der Stickstoffdüngemittel auf sämtlichen Parzellen der gleiche war, d. h. daß der in dieser Zeit durch Düngung zugeführte Ammoniumstickstoff vollständig in NO_3 -N umgewandelt und zum größten Teil in der Schicht von 0 - 13 cm und zu einem geringeren Teil in der darunter liegenden 13 - 26 cm-Schicht wiedergefunden wurde.

GLIEMEROTH (1959) verfolgte die Stickstoffauswaschung über Winter auf einem Lößlehm in Abhängigkeit von Stickstoff-Form, Menge und Düngemitteln. Er gelangte zur Feststellung, daß die Verlagerung von Kalksalpeter hauptsächlich vom Ausmaß der Sickerwassermenge sowie von gewissen Bodenfrostwirkungen abhängig ist, die wiederum in erster Linie auf den vorwinterlichen Temperaturverlauf zurückzuführen sind.

MAAB (1961) hat Versuche angestellt, um den Einfluß von Ammoniak- und Nitratdünger auf den Gehalt des Bodens an mineralischem Stickstoff zu untersuchen.

Er konnte im Boden vorübergehend N-Mengen nachweisen, die die zugeführten N-Mengen übertrafen. Er weist diese Erscheinung darauf zurück, daß die N-Düngung

die Mineralisation des Bodenstickstoffs angeregt bzw. gefördert hat.

W. BOGUSLAWSKI und ATANASIU (1964) führten Kleinsystemversuche mit ^{15}N , und zwar mit beiden N-Formen ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$) durch. Nach Versuchsende stellten sie in den mit $\text{HN}_4\text{-N}$ gedüngten Gefäßen einen höheren $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt fest als der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt der mit $\text{NO}_3\text{-N}$ gedüngten Gefäßen. Bei der Bilanz aufstellung wurde ein Fehlbetrag von 15 % der Düngung ermittelt, der, so meinen die Autoren, als Abgabe an die Atmosphäre bezeichnet wird.

Die bisherigen Ausführungen zeigen, daß verschiedene N-Dünger im Boden ein unterschiedliches Verhalten zeigen und unter verschiedenen Faktoren unterschiedliche Eindringungstiefen haben können.

Während $\text{NO}_3\text{-N}$ einer wahrscheinlichen Auswaschungsgefahr unterliegt, wird ein Teil des sich im Boden befindlichen Ammoniumstickstoffs vom Boden festgehalten. $\text{NH}_4\text{-N}$ -Festlegung ist oft ein vorübergehender Vorgang, dessen Dauer von den chemischen und biologischen Gegebenheiten des Bodens bestimmt ist. Für die $\text{HN}_4\text{-N}$ -Festlegung sind die organischen Bestandteile von Tonmineralen, insbesondere Montmorillonit, Illit und Vermikulit verantwortlich (BOWER, 1950; BARSCHAD, 1951; JANSSON, 1955; ADAMS und STEVENSON, 1964; WESTPHAL, 1964).

Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Festlegung kann entweder an der äußeren Oberfläche der Tonminerale erfolgen (Sorptions) oder durch Eindringen in die Zwischenräume der Schichtpakete (Fixierung). Die Öffnungen der Zwischenschichtpakete (BARSCHAD, 1951; BROWN, 1962; YOUNG, 1964 a), müssen größer sein als der Durchmesser des $\text{NH}_4\text{-Ions}$ ($2,86 \text{ \AA}$), damit der Fixierungsprozeß vonstatten gehen kann. Die Fixierung erfolgt

erst dann, wenn ein NH_4 -Ion in die Öffnung zwischen sechs tangential gelagerten O-Atomen gelangt. Die Fixierung kann bei Montmorillonit und Illit an beiden Molekularoberflächen geschehen, während es bei der Kaolin-Gruppe nur an je einer der beiden Oberflächen möglich ist. Auf Grund dieser Tatsache besitzt Kaolin dem Montmorillonit und Illit gegenüber ein halb so großes Fixierungsvermögen, wenn nur von diesem Gesichtspunkt betrachtet.

Ferner nimmt die Menge des fixierten NH_4 mit der Höhe des Angebotes zu, prozentual jedoch ab (NÖMMIK, 1957).

Das Vorhandensein von verschiedenen Kationen beeinflusst sowohl die Ammoniumfixierung als auch die Austauschbarkeit des fixierten NH_4 -Tons. Wenn K-Ionen in merklich höherer Konzentration vorliegen, gelingt es ihnen in der Regel, die NH_4 -Ionen aus dem Kristallgitter der Minerale zu verdrängen (ALLISON, 1952; NÖMMIK, 1957). Von NÖMMIK (1957) wurde ferner festgestellt, daß eine bevorzugte NH_4 -Fixierung zustande kommt, wenn K- und NH_4 -Ionen gleichzeitig dem Boden zugeführt werden. Bei Zugabe von äquivalenten Mengen an beiden Ionen wurden Kalium und Ammonium im Verhältnis 1 : 3,4 fixiert.

Stärker noch als durch Tonminerale wird NH_4^+ durch die organische Fraktion des Bodens festgelegt. YOUNG (1964 a) beobachtete diese Zusammenhänge und stellte fest, daß von dem durch Minerale sorbierten NH_4 in der Krume 1 - 8 %, im Unterboden 1 - 32 % fixiert wurden. Der Anteil des von der organischen Fraktion fixierten NH_4 betrug dagegen in der Krume 6 - 25 % und im Unterboden 6 - 16 %.

Ammonium wird ferner durch Mikroorganismen festgelegt. Da ihre Körpersubstanz überwiegend aus Eiweiß besteht, ist ihr N-Bedarf groß. In erster Linie verwerten die Mikroorganismen die löslichen N-Verbindungen des Bodens und machen hierdurch den höheren Pflanzen Konkurrenz.

Das fixierte NH_4 -Ion kann u.U. wieder mobilisiert werden. BOWER (1951) konnte mit einer modifizierten Neubauertechnik feststellen, daß 78 - 87 % des sorbierten Ammoniaks, dagegen nur 13 - 28 % des fixierten durch Gerste aufgenommen bzw. mobilisiert werden konnten.

Mittels ^{15}N untersuchte ATANASIU (1968) die Ausnutzung des Bodenstickstoffs und stellte bei stärkerer Fixierung des gedüngten mineralischen Stickstoffs eine stärker erfolgte Aufnahme von Boden-N durch die Pflanze fest.

III. Eigene Untersuchungen

1. Methodik

Nach Beendigung der Sickerwasserversuche (5 Dekaden) wurden die einzelnen Zylinder in sechs Abschnitte zerlegt, wobei die oberen vier je fünf cm, die unteren zwei je 10 cm lang waren.

Die Bestimmung des NO_3 - und NH_4 -Stickstoffs im luftgetrockneten Boden der einzelnen Zylinderabschnitte erfolgte nach der auf Seite 24 beschriebenen Methode. Die ermittelten NO_3 - und NH_4 -Mengen wurden dann auf mg N je 100 g Boden bzw. auf kg/ha N umgerechnet. Die angegebenen Zahlen sind Mittelwerte aus vier Bestimmungen, d. h. daß in jedem der beiden Parallelzylinder je zwei Parallelanalysen gemacht wurden.

VERLAGERUNGSERGEBNISSE

2. Verlagerung des Nitratstickstoffs

Tabellen 27, 29, 31 und 33 zeigen die Verteilung bzw. Verlagerung des Nitrat-Stickstoffs in den einzelnen Abschnitten der Bodensäulen nach Beendigung des Sickerversuches.

a. Versuchsergebnisse und Diskussion

Eine Stickstoffverlagerung nach unten ist bei allen Böden festzustellen. Daß die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte gleicher Varianten der einzelnen Böden unterschiedlich waren, ist einmal durch den unterschiedlichen Stickstoffgehalt der Böden bedingt. Eine weitere Ursache ist in den unterschiedlichen Bodenmengen gleicher Abschnitte zu sehen. Hinzu kommt, daß die einzelnen N-Dünger unterschiedliches Eindringungsvermögen besitzen, wie dies aus den Ergebnissen zu entnehmen ist.

Bei allen Böden wurde deutlich, daß die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Verlagerung am höchsten bei den mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten mit und ohne Calcium und am geringsten bei den Varianten 3 und 7 (AN und K + AN) war. Dazwischen lagen die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte der Varianten 4 und 8 (KS, K + KS). In den unteren Abschnitten stiegen im allgemeinen die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte an.

Im Boden Lich (Tabelle 27) zeigt sich das folgende Bild: Die niedrigsten $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte ergeben sich insgesamt für die nicht mit Stickstoff gedüngten Varianten 1, 2 und 6. Jedoch ist die Verteilung des $\text{NO}_3\text{-N}$ auf die einzelnen Abschnitte nicht gleichmäßig, sondern es sind deutlich höhere $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte im 2. und 3. Abschnitt zu erkennen, bei Variante 6 auch in der obersten Schicht. Die niedrigsten $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte

Tabelle 27

Verteilung bzw. Verlagerung von Nitratstickstoffs
im Boden "Lich"
 (mg NO₃-N in 100 g Boden)

Variante	Abschnitt cm	NO ₃ -N	Variante	Abschnitt cm	NO ₃ -N
1	0 - 5	1,92	6	0 - 5	2,33
(Kontr.)	5 - 10	2,43	(P+K)	5 - 10	2,54
	10 - 15	2,21		10 - 15	2,35
	15 - 20	1,54		15 - 20	1,57
	20 - 30	1,42		20 - 30	1,45
	30 - 40	1,83		30 - 40	1,88
2	0 - 5	1,79	7	0 - 5	4,48
(P)	5 - 10	2,35	(P+K+AS)	5 - 10	4,84
	10 - 15	2,31		10 - 15	4,49
	15 - 20	1,58		15 - 20	3,84
	20 - 30	1,53		20 - 30	2,74
	30 - 40	1,87		30 - 40	2,42
3	0 - 5	4,02	8	0 - 5	3,30
(P+AS)	5 - 10	4,48	(P+K+AN)	5 - 10	2,74
	10 - 15	4,71		10 - 15	4,94
	15 - 20	4,00		15 - 20	5,77
	20 - 30	2,89		20 - 30	4,49
	30 - 40	2,36		30 - 40	2,79
4	0 - 5	2,79	9	0 - 5	2,16
(P+AN)	5 - 10	2,52	(P+K+KS)	5 - 10	3,16
	10 - 15	5,46		10 - 15	3,58
	15 - 20	5,95		15 - 20	2,79
	20 - 30	4,34		20 - 30	3,27
	30 - 40	2,37		30 - 40	3,37
5	0 - 5	2,10			
(P+KS)	5 - 10	3,00			
	10 - 15	3,70			
	15 - 20	2,85			
	20 - 30	3,42			
	30 - 40	3,32			

sind bei allen Varianten im 4. und 5. Abschnitt (15 - 30 cm) zu finden, während der unterste Abschnitt wieder erhöhte Werte erkennen läßt.

In den Varianten 3 - 5 ergeben sich bei den einzelnen N-Düngemitteln gewisse Unterschiede. Das trifft besonders für Varianten 3 und 4 zu, die zwar insgesamt etwa gleiche Mengen in den Bodensäulen enthalten, wo die Verteilung dieses Stickstoffs aber recht unterschiedlich ist. Bei Variante 3 sind die höchsten Gehalte im Abschnitt 2 und 3 zu finden bei einem ebenfalls hohen Gehalt im obersten Abschnitt 1. Bei Variante 4 dagegen ergeben sich die höchsten Gehalte in den Abschnitten 3 - 5, bei niedrigen Gehalten in den beiden obersten Abschnitten. In Variante 5 ist der NO_3 -Gehalt, bis auf den obersten Abschnitt, über die gesamte Säule ziemlich gleich hoch.

Die Kaliumdüngung in den Varianten 7 - 9 veränderte die NO_3 -N-Verteilung innerhalb der Säulen, im Vergleich zu den Varianten 3 - 5 nur wenig. Auch in Variante 7 (AS) sind hohe Gehalte an NO_3 -N in den vier obersten Schichten anzutreffen, hingegen bei Variante 8 (AN) stark erhöhte Gehalte in den Abschnitten 3 - 5. Variante 9 (KS) läßt dieselbe gleichmäßige Verteilung erkennen wie Variante 5.

Insgesamt enthalten die nicht mit Stickstoff gedüngten Säulen 1, 2 und 6 annähernd gleiche Mengen NO_3 -N; bei Variante 6 ist eine leichte Erhöhung festzustellen (Tabelle 28).

Bildet man hinsichtlich des Gesamtgehaltes bei Säulen an NO_3 -N die Differenz zwischen den dem N gedüngten und den entsprechenden Vergleichsvarianten 2 bzw. 6, so ergeben sich für die mit N gedüngten Varianten die Zunahmen (Tabelle 28).

Tabelle 28

Gesamt-NO₃-N-Gehalte der Säulen
des Bodens "Lich"

Variante	mg NO ₃ -N/Säule	mg NO ₃ -N/Säule aus Düngung
1 (Kontr.)	5,79	-
2 (P)	5,85	-
3 (P+AS)	9,72	4,87
4 (P+AN)	11,85	6,00
5 (P+KS)	10,25	4,40
6 (P+K)	6,12	-
7 (P+K+AS)	11,13	5,01
8 (P+K+AN)	12,41	6,29
9 (P+K+KS)	10,61	4,49

In den beiden Varianten mit Ammoniumnitrat-Düngung sind die höchsten NO₃-N-Mengen aller Säulen anzutreffen. Es folgt der Nitratgehalt der mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten 3 und 7. Die mit Kalisalpeter gedüngten Varianten 5 und 9 weisen die niedrigsten NO₃-N-Gehalte auf.

Die Verteilung bzw. Verlagerung des Nitratstickstoffs in den Varianten des sauren Bodens Obertshausen I (Tabelle 29) ist unterschiedlich. Die NO₃-N-Mengen der Varianten 1, 2 und 6 sind etwa gleich. In der Verteilung des Nitrats jedoch sind Unterschiede festzustellen. Der NO₃-Gehalt nimmt in dem zweiten Abschnitt (5 - 10 cm) zu, während sich im 3. Abschnitt eine leichte Abnahme zeigte. Im 5. und 6. Abschnitt (20 - 30 und 30 - 40 cm) tritt erneut eine Erhöhung der NO₃-N-Werte ein.

Tabelle 29

Verteilung bzw. Verlagerung von Nitratstickstoff
im Boden "Obertshausensauer I"
 (mg NO₃-N in 100 g Boden)

Variante	Abschnitt cm	NO ₃ -N	Variante	Abschnitt cm	NO ₃ -N
1	0 - 5	0,62	6	0 - 5	0,65
(Kontr.)	5 - 10	0,64	(P+K)	5 - 10	0,75
	10 - 15	0,51		10 - 15	0,77
	15 - 20	0,93		15 - 20	0,65
	20 - 30	0,76		20 - 30	0,80
	30 - 40	0,82		30 - 40	0,86
2	0 - 5	0,60	7	0 - 5	1,48
(P)	5 - 10	0,62	(P+K+AS)	5 - 10	2,44
	10 - 15	0,53		10 - 15	2,54
	15 - 20	0,94		15 - 20	2,32
	20 - 30	0,77		20 - 30	1,82
	30 - 40	0,84		30 - 40	1,56
3	0 - 5	1,77	8	0 - 5	1,02
(P+AS)	5 - 10	1,94	(P+K+AN)	5 - 10	1,35
	10 - 15	2,22		10 - 15	1,70
	15 - 20	2,37		15 - 20	1,82
	20 - 30	2,03		20 - 30	1,39
	30 - 40	1,51		30 - 40	2,15
4	0 - 5	0,89	9	0 - 5	0,71
(P+AN)	5 - 10	1,24	(P+K+KS)	5 - 10	1,17
	10 - 15	1,39		10 - 15	1,39
	15 - 20	2,10		15 - 20	1,42
	20 - 30	2,29		20 - 30	1,82
	30 - 40	1,96		30 - 40	1,84
5	0 - 5	0,70			
(P+KS)	5 - 10	0,94			
	10 - 15	1,09			
	15 - 20	1,48			
	20 - 30	0,66			
	30 - 40	1,62			

In den mit verschiedenen N-Düngern gedüngten Varianten sind die Gehalte an $\text{NO}_3\text{-N}$ unterschiedlich, hinsichtlich der Verteilung besteht aber eine einheitlichere Tendenz. Vom 1. bis zum 4. Abschnitt erfolgt eine stetige Zunahme des NO_3 -Gehaltes, in den beiden unteren Abschnitten sanken die Gehalte wieder etwas ab. Das gilt auch für die Varianten 7 und 8, nicht aber für Variante 9 (K+KS), wo eine stetige Zunahme bis zum letzten Abschnitt erfolgte. Etwas abweichend hiervon ist die NO_3 -Verteilung der Variante 5 (KS). Der geringe $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt des 1. Abschnitts steigert sich bis zum 4. Abschnitt (15 - 20 cm) und sinkt im 5. Abschnitt wieder ab. Hier wurde der niedrigste Nitrat-Gehalt ermittelt. Im 6. Abschnitt trat eine erneute Zunahme ein.

Tabelle 30 zeigt für Boden Obertshausen I die Gesamt- $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte in den einzelnen Bodensäulen.

Tabelle 30

Gesamt- $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte der Säulen
des Bodens Obertshausen I

Variante	mg $\text{NO}_3\text{-N}$ -/Säule	mg $\text{NO}_3\text{-N}$ -/Säule aus Düngung
1 (Kontr.)	2,94	-
2 (P)	3,05	-
3 (P+AS)	8,21	5,16
4 (P+AN)	7,35	4,30
5 (P+KS)	5,45	2,40
6 (P+K)	3,09	-
7 (P+K+AS)	8,33	5,24
8 (P+K+AN)	7,35	4,26
9 (P+K+KS)	5,77	2,68

In den mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten (3 und 7) wurden die Höchstwerte an $\text{NO}_3\text{-N}$ ermittelt. Dann folgt der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt der mit Ammoniumnitrat gedüngten Varianten 4 und 8. Am niedrigsten von den N-Düngungsvarianten lagen die beiden Säulen mit Kalksalpeter-Düngung 5 und 9. Diese Erscheinung, die auch bereits beim Boden Lich zu verzeichnen war, daß nämlich in den mit Nitrat-N gedüngten Säulen die niedrigsten Mengen Nitrat vorhanden sind, während in den nur mit $\text{NH}_4\text{-N}$ gedüngten Varianten die höchsten $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte anzutreffen sind, ist bemerkenswert.

Bei dem aufgekalkten Boden Obertshausen II (Tabelle 31) liegen die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Mengen der Variante 1, 2 und 6 niedriger als bei dem ursprünglichen Boden. Bei allen Varianten ohne Düngung zeichnet sich eine dahin gehende Tendenz ab, daß von oben nach unten ein allmählicher Anstieg des $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehaltes erfolgt. Auch hier weisen die mit den verschiedenen N-Düngern gedüngten Varianten ungleiche Mengen an $\text{NO}_3\text{-N}$ auf.

Außerdem treten bei der Verlagerung des Nitratstickstoffs Unterschiede ein. Die höchsten Nitrat-Werte sind wiederum bei den mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten 3 und 7 anzutreffen. Der Nitrat-Gehalt nimmt allmählich vom obersten zum untersten Abschnitt zu. Das trifft auch für die beiden Varianten mit Ammoniumdüngung zu, jedoch sind hier die obersten Schichten deutlich ärmer an Nitrat, während die beiden untersten Schichten ähnlich hohe Nitrat-Gehalte aufweisen, wie die Variante 3 und 7 (AS). Eine weitgehende Verarmung an $\text{NO}_3\text{-N}$ ist in den beiden Varianten des Kalksalpeters (5 und 9) festzustellen. Die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte liegen kaum höher als nicht mit Stickstoffgedüngten Varianten. Die Tabelle 32 zeigt die Gehalte an Gesamt- $\text{NO}_3\text{-N}$.

Tabelle 31

Verteilung bzw. Verlagerung von Nitratstickstoff

im Boden "Obertshausen II"

(mg $\text{NO}_3\text{-N}$ in 100 g Boden)

Variante	Abschnitt cm	$\text{NO}_3\text{-N}$	Variante	Abschnitt cm	$\text{NO}_3\text{-N}$
1	0 - 5	0,60	6	0 - 5	0,54
(Kontr.)	5 - 10	0,60	(P+K)	5 - 10	0,43
	10 - 15	0,60		10 - 15	0,67
	15 - 20	0,62		15 - 20	0,85
	20 - 30	0,78		20 - 30	0,87
	30 - 40	0,86		30 - 40	0,85
2	0 - 5	0,58	7	0 - 5	1,70
(P)	5 - 10	0,64	(P+K+AS)	5 - 10	1,84
	10 - 15	0,64		10 - 15	2,44
	15 - 20	0,65		15 - 20	2,33
	20 - 30	0,77		20 - 30	2,69
	30 - 40	0,83		30 - 40	2,81
3	0 - 5	1,80	8	0 - 5	0,70
(P+AS)	5 - 10	2,09	(P+K+AN)	5 - 10	0,94
	10 - 15	2,36		10 - 15	1,46
	15 - 20	2,04		15 - 20	1,98
	20 - 30	2,59		20 - 30	2,39
	30 - 40	2,77		30 - 40	2,53
4	0 - 5	0,80	9	0 - 5	0,29
(P+AN)	5 - 10	1,25	(P+K+KS)	5 - 10	0,40
	10 - 15	1,32		10 - 15	0,80
	15 - 20	1,60		15 - 20	1,14
	20 - 30	2,30		20 - 30	1,12
	30 - 40	2,64		30 - 40	0,97
5	0 - 5	0,59			
(P+KS)	5 - 10	0,66			
	10 - 15	0,44			
	15 - 20	0,28			
	20 - 30	0,63			
	30 - 40	0,75			

Tabelle 32
Gesamt-NO₃-N-Gehalt der Säulen
des Bodens Obertshausen II

Variante	mg NO ₃ -N/Säule	mg NO ₃ -N/Säule aus Düngung
1 (Kontr.)	2,93	-
2 (P)	2,93	-
3 (P+AS)	9,57	6,60
4 (P+AN)	7,53	4,60
5 (P+KS)	2,39	0,54
6 (P+K)	3,03	-
7 (P+K+AS)	9,79	6,76
8 (P+K+AN)	7,78	4,75
9 (P+K+KS)	3,64	0,61

Die Höchstwerte an NO₃-N wurden bei den mit schwefel-saurem Ammoniak gedüngten Varianten 3 und 7 nachgewiesen, während das durch Kalksalpeter zugeführte Nitrat völlig der Auswaschung unterlegen ist. Vergleicht man diese Werte mit denen der Tabelle 30, so wird der Einfluß der Kalkung auf den Nitrat-Gehalt deutlich: Für Ammonium-nitrat ergeben sich in beiden Fällen ähnliche NO₃-N-Gehalte, bei Ammoniumsulfat hat die Kalkung die Nitrifikation sichtlich gefördert; im Falle des Kalksalpeters ist, wie bereits erwähnt, die NO₃-N-Auswaschung deutlich erhöht worden.

Bei dem Boden Darmstadt (Tabelle 33) weisen die Variante 1 und 2 etwa gleiche Mengen an NO₃-N auf, während die Variante 6 etwas höheren NO₃-N-Werte zeigte. In den ersten beiden Abschnitten der Varianten ohne N-Düngung (1, 2 und 6) war der Nitrat-Gehalt etwas geringer. Ansonsten bot sich innerhalb der Abschnitte von 3 bis 6

Tabelle 33

Verteilung bzw. Verlagerung von Nitrat-
stickstoffs im Boden "Darmstadtneutral"

(mg $\text{NO}_3\text{-N}$ in 100 g Boden)

Variante	Abschnitt cm	$\text{NO}_3\text{-N}$	Variante	Abschnitt cm	$\text{NO}_3\text{-N}$
1 (Kontr.)	0 - 5	0,44	6 (P+K)	0 - 5	0,47
	5 - 10	0,44		5 - 10	0,54
	10 - 15	0,52		10 - 15	0,56
	15 - 20	0,53		15 - 20	0,46
	20 - 30	0,51		20 - 30	0,55
	30 - 40	0,54		30 - 40	0,62
2 (P)	0 - 5	0,43	7	0 - 5	1,50
	5 - 10	0,45		5 - 10	1,68
	10 - 15	0,51		10 - 15	2,16
	15 - 20	0,56		15 - 20	1,92
	20 - 30	0,53		20 - 30	2,21
	30 - 40	0,55		30 - 40	2,43
3 (P+AS)	0 - 5	1,54	8 (P+K+AN)	0 - 5	0,78
	5 - 10	1,73		5 - 10	1,09
	10 - 15	2,20		10 - 15	2,64
	15 - 20	1,96		15 - 20	2,74
	20 - 30	2,17		20 - 30	2,09
	30 - 40	2,34		30 - 40	2,07
4 (P+AN)	0 - 5	0,75	9 (P+K+KS)	0 - 5	0,50
	5 - 10	1,01		5 - 10	0,44
	10 - 15	1,16		10 - 15	0,74
	15 - 20	1,52		15 - 20	0,92
	20 - 30	1,96		20 - 30	1,26
	30 - 40	2,04		30 - 40	1,54
5 (P+KS)	0 - 5	0,46			
	5 - 10	0,49			
	10 - 15	0,74			
	15 - 20	0,70			
	20 - 30	0,78			
	30 - 40	0,83			

ein einheitliches Bild dar, wenn man von kleinen Schwankungen absieht, d.h. weder Phosphat- noch Kaliumdüngung den Nitrat-Gehalt des Bodens nennenswert beeinflußt haben.

Bei den mit den einzelnen N-Düngern gedüngten Varianten waren sowohl die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte als auch ihre Verteilung Schwankungen unterworfen. Die Variante 3, mit wiederum dem insgesamt höchsten Gehalt an $\text{NO}_3\text{-N}$ wies die höchsten $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte in den weiteren Abschnitten 3 bis 6 (10 - 40 cm) auf. Der Nitrat-Gehalt des ersten Abschnitts war am niedrigsten. Im zweiten Abschnitt trat eine geringe Zunahme des Nitrats ein.

In dem ersten Abschnitt der Variante 4 (AN) war der Nitrat-Gehalt niedrig, kaum höher als in den nicht mit N gedüngten Bodensäulen. Mit zunehmender Tiefe nahm der Nitratstickstoff zu. Die Höchstwerte fanden sich in den Abschnitten 5 und 6 (20 - 40 cm).

Der Nitrat-Gehalt der Variante 5 (K+KS) ist, verglichen mit den Gehalten der Varianten 3 und 4, auch auf diesem Boden sehr gering.

Von oben nach unten nahmen die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte etwas zu. Ähnliche Werte wie die Varianten 3 bis 5 lieferten die mit Kalium gedüngten Säulen 7 bis 9.

Bei Variante 7 traten ebenfalls erhöhte $\text{NO}_3\text{-N}$ -Mengen in die Nitrat-Gehalte bis auf die des vierten Abschnitts kontinuierlich zu.

Deutlich erhöhte Nitrat-Werte sind in den Abschnitten 3 bis 4 der Variante 8 (K+AN) zu erkennen. Den niedrigsten Gehalt an $\text{NO}_3\text{-N}$ weist der oberste Abschnitt auf.

Die Tabelle 34 zeigt die Gehalte an Gesamt- $\text{NO}_3\text{-N}$ des Bodens Darmstadtneutral.

Tabelle 34
Gesamt-NO₃-Gehalte der Säulen des
Bodens Darmstadtneutral

Variante	mg NO ₃ -N/Säule	mg NO ₃ -N/Säule aus Düngung
1 (Kontr.)	2,03	-
2 (P)	2,10	-
3 (P+AS)	8,27	6,17
4 (P+AN)	6,50	4,40
5 (P+KS)	2,99	0,89
6 (P+K)	3,28	-
7 (P+K+AS)	9,48	6,20
8 (P+K+AN)	7,98	4,70
9 (P+K+KS)	4,18	0,90

Wie aus den Ergebnissen hervorgeht, werden die Höchstmengen an Nitratstickstoff bei den Varianten 3 und 7 nachgewiesen, gefolgt von Varianten 5 und 8.

In den mit Kalksalpeter gedüngten Varianten 5 und 9 ist fast sämtlicher Nitrat aus der Düngung ausgewaschen worden. Vergleicht man den kalkhaltigen Boden Darmstadt mit dem aufgekalkten Boden Obertshausen, so ergibt sich in den mit Stickstoff gedüngten Varianten fast das gleiche Bild: Hohe Gehalte an NO₃-N, nach Düngung mit Ammoniumsulfat; völlige Auswaschung des Düngerstickstoffs bei Kalksalpeter.

Die Versuche zeigten, daß die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte bei vier Versuchsböden verschieden waren. Die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Verteilung zeigte folgendes Bild: In den obersten Abschnitten waren die Nitrat-Mengen gering, mit der Tiefe aber nahmen sie mehr oder weniger zu. Die Zunahmen hingen mit der Textur des Bodens und den unterschiedlichen Verlagerungstendenzen der N-Dünger zusammen.

Die aufkalkung verstärkte die Verlagerung bei dem aufgekalkten Obertshausen II. Dafür sprechen die niedrigen $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte der Varianten 1, 2 und 6 ohne N-Düngung und höheren $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte der mit N gedüngten Varianten.

Die Tatsache, daß in den mit N gedüngten Varianten auf dem aufgekalkten Obertshausen sowohl die Auswaschung- als auch die Verlagerungswerte an Nitrat höher waren als in den entsprechenden Varianten des sauren Obertshausen I, weist auf in dem aufgekalkten Boden stärker erfolgte Nitrifikation hin.

Weitgehende Ähnlichkeit in $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalten und in der Verlagerung bestand zwischen dem aufgekalkten Boden Obertshausen und dem von zu Hause aus kalkhaltigen Boden Darmstadt.

Der höchste $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt innerhalb der Bodensäulen wurde bei dem Boden Lich nachgewiesen. Die Nitrat-Werte waren bei den Sandböden geringer und zeigten im Hinblick auf Nitratverlagerung ein ähnliches Bild auf.

b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse:

1. Die Untersuchungen der Bodensäulen auf ihren Gehalt an $\text{NO}_3\text{-N}$ ergab eine unterschiedliche Verteilung bzw. Verlagerung bei den vier Versuchsböden.
2. Die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Verlagerung des bodeneigenen Nitrat-N lag innerhalb enger Grenzen und war gering, während der Düngerstickstoff eine unterschiedliche Verlagerung zeigte.
3. Schwefelsaures Ammoniak erhöhte den $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt besonders in den oberen Schichten, Ammoniumnitrat hauptsächlich in den tieferen Schichten. Bei den mit Calciumnitrat gedüngten Varianten konnten geringe Mengen des Düngerstickstoffs nachgewiesen werden, vorwiegend in den weiteren Abschnitten der Bodensäulen.
4. Kaliumdüngung hat die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Verlagerung verstärkt, dieselbe Wirkung zeigte auch die Aufkalkung.
5. Phosphatdüngung hat die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Verteilung nicht beeinflusst.

3. Verteilung bzw. Verlagerung von Ammoniumstickstoff

a. Versuchsergebnisse und Diskussion

In den Tabellen 35, 37, 39 und 41 sind die für die Verteilung bzw. Verlagerung des Ammoniumstickstoffs ermittelten Werte des $\text{NH}_4\text{-N}$ aufgeführt.

Ganz allgemein ist zur Beurteilung der Ergebnisse zu sagen, daß in den $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalten gleicher Varianten der einzelnen Böden Unterschiede zu sehen sind. Die Ursache hierfür ist zum Teil in den unterschiedlichen Bodenmengen gleicher Abschnitte zu suchen, zum Teil sind die Unterschiede auf die unterschiedliche Textur der Böden zurückzuführen. Innerhalb der mit N gedüngten Varianten eines Bodens ergaben sich ebenfalls unterschiedliche $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte, die in erster Linie spezifisch mit der Form des gedüngten Stickstoffs zusammenhängen.

Die Höchstmengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ traten erwartungsgemäß bei den mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten mit und ohne Kalium ein (3 und 7). In den mit Ammoniumnitrat gedüngten Varianten 4 und 8 fanden sich etwas niedrigere Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ als in den Varianten 3 und 7.

In den mit Kalksalpeter gedüngten Varianten wurden $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen ermittelt, die denen der nicht mit N gedüngten Varianten 1, 2 und 6 glichen und z.T. unter diesen Werten liegen.

Die Untersuchung der einzelnen Säulen bei dem Boden Lich (Tabelle 35) ergab hinsichtlich der Mengen bzw. der Verteilung des $\text{NH}_4\text{-N}$ folgendes Bild:

Die niedrigsten $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen ergaben sich für die nicht mit N gedüngten Varianten 1, 2, 6 und ganz besonders für die beiden mit Kalksalpeter gedüngten Varianten 5 und 9. In den obersten Abschnitten 1-4 (0-20 cm) der Varianten 1, 2, 6, 5 und 9 waren etwas höhere und ziemlich gleichmäßige Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ vorhanden, im Gegensatz zu den beiden untersten Abschnitten.

Tabelle 35

Verteilung bzw. Verlagerung von Ammoniumstick-
stickstoff im Boden " Lich "
 (mg $\text{NH}_4\text{-N}$ in 100 g Boden)

Variante	Abschnitt cm	$\text{NH}_4\text{-N}$	Variante	Abschnitt cm	NH_4N
1	0- 5	2,40	6	0- 5	2,31
(Kontr.)	5-10	2,23	(P+K)	5-10	2,12
	10-15	2,44		10-15	2,43
	15-20	2,25		15-20	2,24
	20-30	1,73		20-30	1,73
	30-40	2,02		30-40	2,24
2	0- 5	2,43	7	0- 5	9,89
(P)	5-10	2,24	(P+K+AS)	5-10	8,27
	10-15	2,46		10-15	6,69
	15-20	2,22		15-20	5,64
	20-30	1,82		20-30	2,09
	30-40	2,02		30-40	2,11
3	0- 5	10,10	8	0- 5	5,89
(P+AS)	5-10	7,67	(P+K+AN)	5-10	4,33
	10-13	6,29		10-15	5,13
	15-20	4,41		15-20	4,50
	20-30	1,80		20-30	1,70
	30-40	2,00		30-40	2,20
4	0- 5	6,00		0- 5	1,90
(P+AN)	5-10	4,44	(P+K+KS)	5-10	2,09
	10-15	5,92		10-15	2,30
	15-20	4,86		15-20	1,95
	20-30	2,29		20-30	1,57
	30-40	2,00		30-40	2,03
5	0- 5	2,38			
	5-10	2,07			
	10 - 15	2,55			
	15-20	2,29			
	20-30	1,74			
	30-40	1,87			

Der niedrigste $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt fand sich im Abschnitt 5, während sich im 6. Abschnitt wieder eine geringe Zunahme abzeichnet.

Die Gesamt- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Menge der Varianten 3 und 7 liegen höher als die der Varianten 4 und 8. In den obersten Abschnitten 1 bis 3 (0-15 cm) der Varianten 3 und 7 (AS und K+AS) trafen die Höchstmengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ ein, die mit zunehmender Tiefe abnehmen. Die geringsten Ammoniummengen ergaben sich hier in den untersten Abschnitten; sie liegen in der gleichen Größenordnung wie in den nicht mit Stickstoff gedüngten Varianten.

In den Varianten 4 und 8 (AN und K+AN) sind deutlich höhere Werte in den vier obersten Abschnitten (0-20 cm) zu sehen, die eine relativ gleichmäßige Verteilung des $\text{NH}_4\text{-N}$ erkennen lassen. In den beiden unteren Abschnitten wurden ähnliche $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte nachgewiesen, wie bei AS bzw. den ungedüngten Varianten.

Aus Tabelle 36 geht hervor, daß der durch die Düngung zugeführte Ammoniumstickstoff am Versuchsende in unterschiedlichen Mengen nachgewiesen wurde:

Tabelle 36
Gesamt- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte der Säulen des Bodens
"Lich"

Variante	mg $\text{NH}_4\text{-N}$ /Säule	mg $\text{HN}_4\text{-N}$ /Säule aus Düngung
1 (Kontr.)	6,92	-
2 (P)	6,72	-
3 (P+AS)	13,96	7,24
4 (P+AN)	10,72	4,00
5 (P+KS)	6,69	-0,03
6 (P+K)	6,76	-
7 (P+K+AS)	14,42	7,66
8 (P+K+AN)	10,74	3,98
9 (P+K+KS)	6,55	-0,21

Die Tabelle 36 zeigt, daß sich die Höchstmengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ in den mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten 3 und 7 finden. Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Werte der mit Ammoniumnitrat gedüngten Varianten 4 und 8 folgen an zweiter Stelle, da Ammoniumnitrat auf Grund seiner Verbindungsform halb so viel $\text{HN}_4\text{-N}$ besitzt wie das Ammoniumsulfat. Die mit den beiden NH_4 -Formen gedüngten Varianten wiesen nach Versuchsende geringere Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ auf, als durch die Düngung zugeführt wurde. Wenn die in den entsprechenden Varianten aufgetretenen höheren $\text{NO}_3\text{-N}$ -Mengen mitbetrachtet werden, so deuten sie auf die in den Varianten 3, 7 und 4, 8 erfolgte Nitrifikation hin. Diese Tatsache wird außerdem durch die niedrigen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen der Variante 5 und 9 bestätigt, deren Werte unter denen von 1, 2 und 6 liegen.

Im Boden Obertshausen I sind (Tabelle 37) die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen der nicht mit N gedüngten Varianten 5 und 9 niedriger als auf dem Boden Lich. Während die Ammoniumgehalte der Varianten 1 und 5 einander ähneln, sind in den mit Kalium gedüngten Varianten 6 und 9 die Gehalte etwas niedriger. Die Verteilung jedoch weist auf eine ähnliche Tendenz hin. Während ihre obersten drei Abschnitte (0-15 cm) etwas höhere $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen beinhalten, sinken sie in den Abschnitten 4 und 5, um im 6. Abschnitt wieder etwas höher zu werden.

Von den mit N gedüngten Varianten zeigen hohe N-Gehalte die Varianten 3 und 7 (AS und K+AS) bzw. 4 und 8 (AN und K+AN) an $\text{NH}_4\text{-N}$, während die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen der mit Kalksalpeter gedüngten Varianten sogar unter denen der nicht mit N gedüngten Varianten liegen. Die Verteilung des $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalts in den Varianten 3 und 7, in denen die Höchstmengen an N nachgewiesen wurden, beschränkt sich auf die obersten vier Abschnitte (0-20 cm), um dann stark abzunehmen. Dagegen fanden sich bei den Varianten 4 und 8 die Höchstmengen an $\text{NH}_4\text{-N}$

Tabelle 37

Verteilung bzw. Verlagerung von Ammoniumstick-
stoffs im Boden "Obertshausensauer I"

(mg $\text{NH}_4\text{-N}$ in 100 g Boden)

Variante	Abschnitt cm	$\text{NH}_4\text{-N}$	Variante	Abschnitt cm	$\text{NH}_4\text{-N}$
1	0 - 5	1,39	6	0 - 5	1,25
(Kontr.)	5 - 10	1,22	(P+K)	5 - 10	1,28
	10 - 15	1,14		10 - 15	1,21
	15 - 20	1,03		15 - 20	1,04
	20 - 30	1,01		20 - 30	0,91
	30 - 40	1,24		30 - 40	0,92
2	0 - 5	1,38	7	0 - 5	5,73
(P)	5 - 10	1,34	(P+K+AS)	5 - 10	5,69
	10 - 15	1,11		10 - 15	5,64
	15 - 20	1,04		15 - 20	3,69
	20 - 30	1,02		20 - 30	0,90
	30 - 40	1,22		30 - 40	0,92
3	0 - 5	6,49	8	0 - 5	2,89
(P+AS)	5 - 10	6,25	(P+K+AN)	5 - 10	3,39
	10 - 15	5,00		10 - 15	4,18
	15 - 20	3,11		15 - 20	5,17
	20 - 30	1,01		20 - 30	0,88
	30 - 40	1,22		30 - 40	0,88
4	0 - 5	2,78		0 - 5	1,23
(P+AN)	5 - 10	3,98	(P+K+KS)	5 - 10	1,19
	10 - 15	3,84		10 - 15	1,27
	15 - 20	5,38		15 - 20	1,26
	20 - 30	1,00		20 - 30	0,90
	30 - 40	1,20		30 - 40	0,91
5	0 - 5	1,36			
(P+KS)	5 - 10	1,33			
	10 - 15	1,16			
	15 - 20	1,04			
	20 - 30	1,01			
	30 - 40	1,20			

in den Abschnitten 2 - 4 (15-20 cm), während der oberste Abschnitt eine Verarmung erkennen läßt. In den untersten Abschnitten 5 und 6 sinken die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen deutlich ab.

In der Tabelle 38 sind die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte aller Bodensäulen zusammengestellt.

Tabelle 38
Gesamt- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte des Bodens
Obertshausen I

Variante	mg $\text{NH}_4\text{-N}$ /Säule	mg $\text{NH}_4\text{-S}$ /Säule aus Düngung
1 (Kontr.)	4,63	-
2 (P)	4,82	-
3 (P+AS)	13,34	8,52
4 (P+AN)	10,42	5,60
5 (P+KS)	4,79	-0,03
6 (P+K)	4,72	-
7 (P+K+AS)	12,49	8,27
8 (P+K+AN)	9,78	5,56
9 (P+K+KS)	4,10	-0,12

Aus der Tabelle 38 geht hervor, daß der höchste $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt bei den mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten 3 und 7 nachgewiesen wurde, gefolgt von den mit Ammoniumnitrat gedüngten Varianten 4 und 8.

Beim Vergleich mit Boden Lich. fällt auf, daß bei Obertshausen I höhere $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen in den mit AS und AN gedüngten Säulen gefunden wurden, was wahrscheinlich auf eine stärkere Nitrifikation im Boden Lich. zurückzuführen ist, aber auch eine stärkere Fixierung dürfte stattgefunden haben.

In dem aufgekalkten Boden Obertshausen II (Tabelle 39) sind in den Varianten mit N-Düngung niedrigere $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte anzutreffen als auf dem ursprünglichen sauren Boden. Die höchsten $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen ergeben sich erwartungsgemäß in den mit $\text{NH}_4\text{-N}$ gedüngten Varianten 3, 7 und 4,8.

In den Abschnitten 1 - 4 (0 - 20 cm) der mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten wurden die Höchstwerte an $\text{NH}_4\text{-N}$ ermittelt. In den beiden untersten Abschnitten wurden ähnlich hohe $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte wie bei den nicht mit Stickstoff gedüngten Varianten nachgewiesen.

Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte der Varianten 4 und 8 (AN und K+AN) zeigen in den obersten Abschnitten eine gleichmäßige Verteilung mit allerdings niedrigeren Werten wie bei den AS-Varianten. In den beiden unteren Abschnitten werden wiederum ähnliche $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte wie bei den Varianten 1, 2 und 6 angetroffen, so daß sich auf diesem Boden nicht von einer $\text{NH}_4\text{-N}$ -Verlagerung in Schichten tiefer als 20 cm gesprochen werden kann. Falls eine Verlagerung stattgefunden haben sollte, so ist dieser in tiefere Schichten eingedrungene Ammoniumstickstoff nachträglich nitrifiziert worden. Die Verteilung des $\text{NH}_4\text{-N}$ war hier relativ gleichmäßig, mit leicht erhöhten Werten im ersten und vierten Abschnitt.

Die niedrigsten Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ konnten in den nicht mit N gedüngten Varianten 1, 2 und 6 nachgewiesen werden. Während der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt der letzten Variante etwas geringer als der der ersten beiden Varianten war, so zeigte sich die Verteilung des Ammoniums ziemlich gleichmäßig, wenn man von kleinen Schwankungen absieht. Ähnliche niedrige $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte wie die Variante 1, 2 und 6 zeigen auch die mit Calciumnitrat gedüngten Varianten 5 und 9; die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Werte sind nicht höher als die der nicht mit N gedüngten Varianten.

Tabelle 39

Verteilung bzw. Verlagerung von
Ammoniumstickstoff im Boden

"Obertshausen II"

(mg $\text{NH}_4\text{-N}$ in 100 g Boden)

Variante	Abschnitt cm	$\text{NH}_4\text{-N}$	Variante	Abschnitt cm	$\text{NH}_4\text{-N}$
1	0 - 5	1,36	6	0 - 5	1,38
(Kontr.)	5 - 10	1,02	(P+K)	5 - 10	1,04
	10 - 15	1,43		10 - 15	1,23
	15 - 20	1,21		15 - 20	1,05
	20 - 30	1,25		20 - 30	1,17
	30 - 40	0,86		30 - 40	0,92
2	0 - 5	1,37	7	0 - 5	4,42
(P)	5 - 10	1,04	(P+K+AS)	5 - 10	4,64
	10 - 15	1,36		10 - 15	4,52
	15 - 20	1,23		15 - 20	3,86
	20 - 30	1,21		20 - 30	1,08
	30 - 40	0,92		30 - 40	0,90
3	0 - 5	4,67	8	0 - 5	2,52
(P+AS)	5 - 10	4,88	(P+K+AN)	5 - 10	2,21
	10 - 15	4,85		10 - 15	2,36
	15 - 20	3,64		15 - 20	2,78
	20 - 30	1,18		20 - 30	1,06
	30 - 40	0,90		30 - 40	0,88
4	0 - 5	2,43	9	0 - 5	1,50
(P+AN)	5 - 10	2,24	(P+K+AS)	5 - 10	0,96
	10 - 15	2,75		10 - 15	1,30
	15 - 20	2,71		15 - 20	1,06
	20 - 30	1,15		20 - 30	1,10
	30 - 40	0,91		30 - 40	0,86
5	0 - 5	1,26			
(P+KS)	5 - 10	1,08			
	10 - 15	1,27			
	15 - 20	1,06			
	20 - 30	1,11			
	30 - 40	0,72			

Die Kaliumdüngung in den Varianten 6 - 9 veränderte die Menge des $\text{NH}_4\text{-N}$ in den einzelnen Varianten nicht, lediglich hinsichtlich der Verteilung ergaben sich geringfügige Unterschiede.

Die Tabelle 40 enthält die Gesamt- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte aller Bodensäulen.

Tabelle 40

Gesamt- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte des Bodens Obertsnausen II

Variante	mg $\text{NH}_4\text{-N}$ /Säule	mg $\text{NH}_4\text{-N}$ /Säule aus Düngung
1 (Kontr.)	4,73	-
2 (P)	4,72	-
3 (P+AL)	11,12	6,46
4 (P+AN)	7,58	2,86
5 (P+KS)	4,24	-0,50
6 (P+K)	4,53	-
7 (P+K+AS)	10,76	6,23
8 (P+K+AN)	7,53	3,00
9 (P+K+KS)	4,37	-0,16

Der Höchstgehalt an Gesamt- $\text{NH}_4\text{-N}$ findet sich auch hier in den Varianten 3 und 7 (KS und K+AS), gefolgt von den mit Ammoniumnitrat gedüngten Varianten 4 und 8. Dagegen bewegten sich die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Werte der beiden mit Kalksalpeter gedüngten Varianten 5 und 9 geringfügig unter den Werten der Varianten 1, 2 und 6.

In den mit $\text{NH}_4\text{-N}$ gedüngten Varianten 3 und 4 bzw. 7 und 8 wurden deutlich erniedrigte $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte im Vergleich mit den ungekalkten Boden angetroffen. Das ist zweifellos auf eine verstärkte Nitrifikation nach der Aufkalkung zurückzuführen. Das wird auch bestätigt durch die höheren Auswaschungszahlen und die höheren $\text{NO}_3\text{-N}$ -werte innerhalb der Säulen (Tabelle 9).

Bei dem Boden Darmstadt (Tabelle 41) weisen die Varianten 1, 2 und 6 den niedrigsten Ammoniumgehalt unter den vier Versuchsböden auf. Hinsichtlich der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Verteilung zeigen diese Varianten ein einheitliches Bild, wobei in den beiden obersten Abschnitten geringe $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen festzustellen sind, während sich von oben nach unten eine geringe aber stetige Zunahme abzeichnet.

Bei den mit $\text{NH}_4\text{-N}$ gedüngten Varianten mit und ohne K zeigte sich folgendes Bild: Die Höchstgehalte an Ammonium-N waren in den obersten vier Abschnitten der Varianten 3 u. 7 zu anzutreffen. In den Abschnitten 5 und 6 (30 - 40 cm) waren die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte die gleichen wie in der Kontrolle, so daß auch auf diesem Boden eine Verlagerung von $\text{NH}_4\text{-N}$ tiefer als 20 cm nicht eingetreten ist. Das gleiche gilt für die Varianten 4 und 8 (AN und K+AN), bei denen die höchsten $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte im dritten und vierten Abschnitt (10 - 20 cm) nachgewiesen wurden.

Die beiden mit Kalksalpeter gedüngten Varianten 5 und 9 haben ähnliche Mengen an Ammonium aufzuweisen wie die nicht mit N gedüngten Varianten.

Tabelle 42 zeigt die Gesamt- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte aller Bodensäulen des Bodens Darmstadt.

Tabelle 41

Verteilung bzw. Verlagerung von Ammoniumnitratstoff
im Boden "Darmstadtneutral"
 (mg $\text{NH}_4\text{-N}$ in 100 g Boden)

Variante	Abschnitt cm	$\text{NH}_4\text{-N}$	Variante	Abschnitt cm	$\text{NH}_4\text{-N}$
1	0 - 5	0,47	6	0 - 5	0,35
(Kontr.)	5 - 10	0,23	(P+K)	5 - 10	0,28
	10 - 15	0,51		10 - 15	0,56
	15 - 20	0,53		15 - 20	0,24
	20 - 30	0,52		20 - 30	0,56
	30 - 40	0,68		30 - 40	0,67
2	0 - 5	0,32	7	0 - 5	4,06
(P)	5 - 10	0,31	(P+K+AS)	5 - 10	4,04
	10 - 15	0,46		10 - 15	4,96
	15 - 20	0,48		15 - 20	3,57
	20 - 30	0,51		20 - 30	0,55
	30 - 40	0,71		30 - 40	0,65
3	0 - 5	4,48	8	0 - 5	1,89
(P+AS)	5 - 10	4,36	(P+K+AN)	5 - 10	1,86
	10 - 15	4,74		10 - 15	2,06
	15 - 20	3,62		15 - 20	2,70
	20 - 30	0,49		20 - 30	0,53
	30 - 40	0,67		30 - 40	0,62
4	0 - 5	1,75	9	0 - 5	0,33
(P+AN)	5 - 10	1,75	(P+K+KS)	5 - 10	0,25
	10 - 15	2,14		10 - 15	0,53
	15 - 20	2,70		15 - 20	0,34
	20 - 30	0,48		20 - 30	0,52
	30 - 40	0,66		30 - 40	0,65
5	0 - 5	0,31			
(P+KS)	5 - 10	0,26			
	10 - 15	0,49			
	15 - 20	0,46			
	20 - 30	0,48			
	30 - 40	0,66			

Tabelle 42
Gesamt-NH₄-Gehalte aller Säulen
des Bodens Darmstadt

Variante	mg NH ₄ -N/Säule	mg NH ₄ -N/Säule aus Düngung
1 (Kontr.)	2,11	-
2 (P)	2,05	-
3 (P+AS)	9,70	7,65
4 (P+AN)	5,55	3,50
5 (P+KS)	1,96	-0,09
6 (P+K)	2,03	-
7 (P+K+AS)	9,65	7,62
8 (P+K+AN)	5,44	3,41
9 (P+K+KS)	1,95	-0,08

Erwartungsgemäß erhielten die mit AS gedüngten Säulen 3 und 7 die größten Mengen an NH₄-N. Der aus der Düngung entstammende Teil war etwa gleich hoch wie auf dem Boden Lich. Die entsprechenden Werte für AN, Varianten 4 und 8 waren etwa halb so hoch. Die mit KS gedüngten Säulen enthielten die geringsten Mengen an NH₄-N aller Varianten.

b. Zusammenfasser der Überblick der Ergebnisse:

1. Bei der Untersuchung der vier Versuchsböden auf den Gehalt an NH₄-N innerhalb der 6 Abschnitte konnte verschieden starke Verlagerung des Ammoniums festgestellt werden.
2. Der höchste Gehalt an NH₄-N wurde auf allen Böden in den mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten ermittelt. Es folgten an zweiter Stelle die Varianten mit AN-Düngung. In den KS-Varianten trat keine Erhöhung des NH₄-N-Gehaltes ein. Im Gegenteil kann eher eine geringe Abnahme im Vergleich zur Kontrolle festgestellt werden.

3. Die Anreicherung mit $\text{NH}_4\text{-N}$ ging auf allen Böden nicht über eine Tiefe von 20 cm hinaus. Bei der AS-Düngung erfolgte die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anreicherung in den obersten 10 cm, während bei der Düngung mit AN die höchsten Gehalte an $\text{NH}_4\text{-N}$ in eine Tiefe von 10 bis 20 cm festzustellen waren.
4. Der höchste Anteil des gedüngten Ammoniumsulfats wurde auf dem stark sauren Boden Obertshausen I wiedergefunden. Die niedrigsten Anteile auf dem gleichen aufgekalkten Boden.
5. Die Kaliumdüngung hatte weder einen nennenswerten Einfluß auf die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte innerhalb der Bodensäulen, noch auf die Verteilung des Ammonium-N.
6. Das gleiche gilt für die Phosphatdüngung in den Varianten 2 (P) im Vergleich zur Variante 1 (ohne P).
7. Eine Kalkung senkte in den betreffenden Säulen den Gehalt an $\text{NH}_4\text{-N}$ aus der Düngung. Die Verteilung innerhalb der Säulen wurde nicht beeinflußt.

4. Verteilung bzw. Verlagerung von Phosphorsäure

Die Verlagerung, Verteilung und Festlegung der Phosphorsäure im Boden wurde von verschiedenen Autoren sowohl mit markierten (HERBST, 1952; RID und SÜSS, 1958; SÜSS, 1962; MACHOLD, 1963) als auch mit nicht markierten Phosphaten (SCHARRER und KÜHN, 1952; MICHAEL und Mitarbeiter, 1953; ZEJSCHWITZ, 1953; HOFMANN, 1958; SCHEFFER und Mitarbeiter, 1960; HEINEMANN, 1962; ULRICH, und HEMPLER, 1962; PFAFF, 1963; HOFMANN und WILBERG, 1966; WIECHMANN, 1966) untersucht. SOMMER (1966) hat die verschiedenen Methoden untereinander verglichen, die bei der Fraktionierung des anorganischen Phosphats im Boden angewandt werden.

a. Ergebnisse und Diskussion

Die bei der Untersuchung der vier Versuchsböden gewonnenen Ergebnisse sind in den Tabellen 43, 45, 47 und 49 zusammengestellt.

Die P_2O_5 -Werte gleichgedüngter Varianten zeigen bei den einzelnen Böden Unterschiede, deren Ursache in den unterschiedlichen Bodengehalte gleicher Abschnitte zu sehen ist. Die P_2O_5 -Gehalte der Variante ohne P-Düngung schwanken innerhalb geringer Grenzen. Diese Schwankungen sind wahrscheinlich nicht auf eine Verlagerung von P_2O_5 zurückzuführen, sondern liegen innerhalb der Fehlergrenzen.

Die Analysenwerte der mit P gedüngten Varianten zeigen, daß eine Verlagerung der P_2O_5 innerhalb der Bodensäulen erfolgt ist. Die Eindringtiefe der P_2O_5 war gering, jedoch ergaben sich bei den einzelnen Böden gewisse Unterschiede. Die Höchstgehalte an P_2O_5 fanden sich im allgemeinen in dem obersten Abschnitt 1. Bei allen Böden nahmen die Stickstoffdünger mehr oder weniger

einen geringen aber doch deutlichen Einfluß auf die Verfügbarkeit der Düngerphosphorsäure: In den mit N gedüngten P-Varianten wurden etwas erhöhte P_2O_5 -Werte ermittelt, die aber statistisch nicht gesichert sein dürfte.

Bei dem Boden Lich (Tabelle 43) mit dem höchsten Gehalt an bodeneigenem P_2O_5 wurden die niedrigsten Anteile der Dünger- P_2O_5 im Doppellactatauszug wiedergefunden, d.h. auf dem Boden Lich die stärkste Festlegung der Dünger- P_2O_5 eintrat. In sämtlichen Varianten wurde die P_2O_5 nur in den drei obersten Abschnitten (0 - 15cm) nachgewiesen.

Tabelle 43

Verteilung bzw. Verlagerung von Phosphorsäure
im Boden "Lich"
 (mg P_2O_5 in 100 g Boden)

Variante	Abschnitt cm	P_2O_5	Variante	Abschnitt cm	P_2O_5
1 (Kontr.)	0 - 5	23,33	6 (P+K)	0 - 5	26,59
	5 - 10	24,42		5 - 10	26,41
	10 - 15	24,51		10 - 15	24,62
	15 - 20	23,51		15 - 20	23,44
	20 - 30	23,02		20 - 30	22,98
	30 - 40	23,25		30 - 40	23,50
2 (P)	0 - 5	26,89	7 (P+K+AS)	0 - 5	29,51
	5 - 10	26,28		5 - 10	28,22
	10 - 15	24,62		10 - 15	24,54
	15 - 20	22,51		15 - 20	23,01
	20 - 30	23,03		20 - 30	23,03
	30 - 40	23,90		30 - 40	22,56
3 (P+AS)	0 - 5	27,64	8 (P+K+AN)	0 - 5	28,10
	5 - 10	27,44		5 - 10	26,69
	10 - 15	25,15		10 - 15	24,62
	15 - 20	23,95		15 - 20	23,21
	20 - 30	23,43		20 - 30	23,21
	30 - 40	24,06		30 - 40	23,23
4 (P+AN)	0 - 5	26,34	9 (P+K+KS)	0 - 5	28,20
	5 - 10	26,72		5 - 10	27,89
	10 - 15	25,09		10 - 15	24,49
	15 - 20	23,03		15 - 20	23,40
	20 - 30	22,87		20 - 30	21,00
	30 - 40	22,78		30 - 40	21,04
5 (P+KS)	0 - 5	27,67			
	5 - 10	27,04			
	10 - 15	25,86			
	15 - 20	22,98			
	20 - 30	22,93			
	30 - 40	22,37			

In der Tabelle 44 sind die Gesamt-P₂O₅-Gehalte zusammengestellt.

Tabelle 44

Gesamt-Gehalte an P₂O₅ aller Bodensäulen
des Bodens "Lich"
 mg P₂O₅/Säule

Variante	mg P ₂ O ₅ /Säule	mg P ₂ O ₅ /Säule aus Düngung
1	75,14	-
2	77,64	2,50
3	77,82	2,68
4	77,78	2,64
5	78,79	2,75
6	77,64	2,50
7	77,79	2,65
8	77,78	2,64
9	77,98	2,84

In den mit Stickstoff gedüngten P-Varianten liegen die P₂O₅-Gehalte etwas höher, d.h. daß die N-Dünger einen geringen Einfluß auf die Lactatlöslichkeit der Dünger-P₂O₅ ausgeübt haben müssen.

Es ist denkbar, daß auf dem sauren Boden Lich, auf dem normalerweise Al- und Fe-Phosphate vorherrschen dürften, durch Anwesenheit von Calciumnitrat die Bildung von Ca-Phosphaten gefördert worden ist, die eine höhere Löslichkeit in der Lactatlösung haben dürften.

Auch bei dem sauren Boden Obertshausen I (Tabelle 45) wurde der höchste Anteil der Dünger-P₂O₅ in dem ersten Abschnitt nachgewiesen. Es konnten aber auch geringe Mengen bis in den dritten Abschnitt (0 - 15 cm) eindringen.

Tabelle 45

Verteilung bzw. Verlagerung von Phosphorsäure

im Boden "Obertshausen I"

(mg P_2O_5 in 100 g Boden)

Variante	Abschnitt cm	c P_2O_5	Variante	Abschnitt cm	P_2O_5
1	0 - 5	8,06	6	0 - 5	11,89
(Kontr.)	5 - 10	8,11	(P+K)	5 - 10	10,49
	10 - 15	8,14		10 - 15	9,26
	15 - 20	8,08		15 - 20	8,18
	20 - 30	8,12		20 - 30	7,50
	30 - 40	8,14		30 - 40	8,27
2	0 - 5	11,51	7	0 - 5	10,86
(P)	5 - 10	10,38	(P+K+AS)	5 - 10	10,38
	10 - 15	8,47		10 - 15	9,61
	15 - 20	7,70		15 - 20	7,84
	20 - 30	7,77		20 - 30	8,00
	30 - 40	7,71		30 - 40	7,84
3	0 - 5	12,63	8	0 - 5	12,01
(P+AS)	5 - 10	10,55	(P+K+AN)	5 - 10	10,49
	10 - 15	8,80		10 - 15	9,84
	15 - 20	6,70		15 - 20	8,04
	20 - 30	7,62		20 - 30	7,88
	30 - 40	8,04		30 - 40	7,98
4	0 - 5	11,10	9	0 - 5	12,47
(P+AN)	5 - 10	10,25	(P+K+KS)	5 - 10	11,36
	10 - 15	9,00		10 - 15	10,18
	15 - 20	8,06		15 - 20	8,04
	20 - 30	7,70		20 - 30	8,12
	30 - 40	7,82		30 - 40	8,21
5	0 - 5	11,83			
(P+KS)	5 - 10	10,55			
	10 - 15	9,19			
	15 - 20	8,06			
	20 - 30	8,82			
	30 - 40	8,10			

Die absoluten P_2O_5 -Mengen liegen, bedingt durch geringe Gehalte an bodeneigenem P_2O_5 , niedriger als die des Bodens Lich.

Die Varianten 2 und 6 (P bzw. P + K) zeigten keine Unterschiede in der P-Verteilung, so daß auch auf diesem Boden ein Einfluß der K-Düngung auf die P-Verlagerung nicht anzunehmen ist.

Tabelle 46
Gesamt- P_2O_5 -Gehalte aller Bodensäulen
des Bodens Obertshausen I

Variante	mg P_2O_5 /Säule	mg P_2O_5 /Säule aus Düngung
1	32,06	-
2	35,57	3,51
3	35,78	3,72
4	35,72	3,66
5	35,98	3,92
6	35,60	3,54
7	35,78	3,72
8	35,70	3,64
9	35,94	3,88

Auch auf diesem sauren Boden Obertshausen I liegen in den Varianten mit Calciumnitratdüngung die P_2O_5 -Gehalte etwas höher. Zwischen Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat bestehen keine sicheren Unterschiede. Ferner geht aus den Werten hervor, daß die Kaliumdüngung die Verfügbarkeit der Dünger- P_2O_5 nicht beeinflusste.

Bei dem Boden Obertshausen II (Tabelle 47) wurden in den mit P gedüngten Varianten im Vergleich zu dem ursprünglichen sauren Boden fast überall etwas höhere P_2O_5 -Werte ermittelt. Die Kalkung hat aber nicht nur

Tabelle 47

Verteilung bzw. Verlagerung von Phosphorsäure
im Boden "Obertshausenaufgekalkt"
(mg P_2O_5 in 100 g Boden)

Variante	Abschnitt cm	P_2O_5	Variante	Abschnitt cm	P_2O_5
1 (Kontr.)	0 - 5	8,13	6 (P+K)	0 - 5	12,09
	5 - 10	8,13		5 - 10	10,58
	10 - 15	8,17		10 - 15	9,04
	15 - 20	8,17		15 - 20	8,82
	20 - 30	8,08		20 - 30	8,01
	30 - 40	7,85		30 - 40	8,11
2 (P)	0 - 5	12,00	7 (P+K+AS)	0 - 5	11,78
	5 - 10	10,72		5 - 10	11,00
	10 - 15	9,01		10 - 15	9,72
	15 - 20	8,87		15 - 20	9,80
	20 - 30	8,17		20 - 30	7,73
	30 - 40	7,83		30 - 40	8,10
3 (P+AS)	0 - 5	11,80	8 (P+K+AN)	0 - 5	11,78
	5 - 10	11,17		5 - 10	11,01
	10 - 15	9,11		10 - 15	9,84
	15 - 20	9,75		15 - 20	9,16
	20 - 30	8,15		20 - 30	7,69
	30 - 40	8,04		30 - 40	7,74
4 (P+AN)	0 - 5	11,67	9 (P+K+KS)	0 - 5	13,85
	5 - 10	11,19		5 - 10	11,56
	10 - 15	9,44		10 - 15	10,06
	15 - 20	9,12		15 - 20	9,45
	20 - 30	8,14		20 - 30	7,71
	30 - 40	8,08		30 - 40	8,00
5 (P+KS)	0 - 5	12,35			
	5 - 10	11,39			
	10 - 15	9,37			
	15 - 20	9,39			
	20 - 30	8,09			
	30 - 40	8,05			

die absoluten verfügbaren P_2O_5 -Mengen, sondern auch die Verteilung der Phosphorsäure beeinflusst. In allen P-Düngungsvarianten konnte eine P_2O_5 -Anreicherung bis in den 4. Abschnitt (0 - 20 cm) nachgewiesen werden.

Der größte Teil der Dünger P_2O_5 blieb aber in den beiden obersten Abschnitten (0 - 10 cm) liegen.

Die Varianten 2 und 6 (P und P+K) weisen in dem obersten Abschnitt ebenso wie die Varianten 5 und 9 (KS und K+KS) etwas erhöhte P_2O_5 -Mengen auf. In den Abschnitten 2 bis 4 nahmen die P_2O_5 -Gehalte kontinuierlich ab.

In den P-Varianten mit N-Düngung liegen die Höchstmengen an P_2O_5 ebenfalls in dem ersten Abschnitt. In den Abschnitten 2 bis 4 zeichnete sich eine stetige Abnahme ab, wobei in den Varianten 5 und 9 etwas höhere P_2O_5 -Werte eintraten.

In der Tabelle 48 sind die Gesamtgehalte an P_2O_5 aller Bodensäulen angegeben.

(Tabelle 48)

Gesamt- P_2O_5 -Gehalte aller Bodensäulen
des Bodens Obertsnausen II

Variante	mg P_2O_5 /Säule	mg P_2O_5 /Säule aus Düngung
1	32,97	-
2	36,97	4,00
3	37,21	4,24
4	37,12	4,15
5	37,51	4,54
6	36,92	3,33
7	37,21	4,24
8	37,06	4,09
9	37,50	4,55

In den P-Varianten mit Calciumnitrat wurden etwas höhere P_2O_5 -Mengen nachgewiesen als in den übrigen Varianten.

Im allgemeinen wurde durch die Aufkalkung in allen Varianten die P_2O_5 besser verfügbar als in dem ursprünglichen Boden Obertshausen I.

Die Untersuchungen verschiedener Verfasser zeigen, daß durch die Kalkung das Verhältnis der P-Verteilung beeinflusst werden kann. CHANG und JACKSON (1958) konnten infolge der Aufkalkung eines sauren Lehmbodens eine Abnahme des Verhältnisses $P(Al, Fe)/P(Ca)$ feststellen. KAILA (1961) wies bei der Aufkalkung nach einigen Monaten eine signifikante Abnahme der Al- und Fe-Phosphate bzw. eine signifikante Zunahme der Ca-Phosphate nach. Die Untersuchungen führten ferner zu dem Ergebnis, daß die Menge des lactatlöslichen Phosphors die Menge der Ca-Phosphate übersteigen kann, d.h. es werden nicht nur P(Ca) sondern auch P(Al) und P(Fe) durch die Lactatlösung gelöst.

Es ist möglich, daß auf dem aufgekalkten Boden Obertshausen II infolge der pH-Erhöhung eine Erhöhung der P(Ca) bewirkt wurde. Nach der Aufkalkung können außer den ursprünglichen Ca-Phosphaten auch die Ca-Phosphate von sekundärem Charakter entstehen, deren Bildung durch die pH-Erhöhung zustande kommt.

Bei dem neutralen Boden Darmstadt (Tabelle 49) ist der Bodenvorrat an P_2O_5 höher als auf dem aufgekalkten Boden Obertshausen II. Die Eindringtiefe ist in beiden Böden etwa die gleiche, d.h. die Düngerphosphorsäure findet sich in den vier obersten Abschnitten (0 - 20 cm). Trotz Unterschiede zeichneten sich die Höchstmengen an P_2O_5 in den mit Calciumnitrat gedüngten Varianten 5 und 9 ab. Hier wurden im Vergleich mit den anderen N gedüngten P-Varianten in allen Abschnitten etwas erhöhte P_2O_5 -Mengen nachgewiesen. Die höchsten P_2O_5 -Mengen fanden sich in den ersten Abschnitten, während

Tabelle 49

Verteilung bzw. Verlagerung von Phosphorsäure

im Boden "Darmstadtneutral"

(mg P_2O_5 in 100 g Boden)

Variante	Abschnitt cm	P_2O_5	Variante	Abschnitt cm	P_2O_5
1 (Kontr.)	0 - 5	11,44	6 (P+K)	0 - 5	14,66
	5 - 10	11,40		5 - 10	13,71
	10 - 15	11,46		10 - 15	13,12
	15 - 20	11,55		15 - 20	11,60
	20 - 30	11,40		20 - 30	10,53
	30 - 40	10,89		30 - 40	10,58
2 (P)	0 - 5	14,34	7 (P+K+AS)	0 - 5	15,14
	5 - 10	13,57		5 - 10	13,90
	10 - 15	12,84		10 - 15	13,20
	15 - 20	12,74		15 - 20	12,25
	20 - 30	10,83		20 - 30	10,74
	30 - 40	11,30		30 - 40	10,91
3 (P+AS)	0 - 5	15,23	8 (P+K+AN)	0 - 5	15,83
	5 - 10	13,47		5 - 10	13,84
	10 - 15	13,58		10 - 15	13,30
	15 - 20	12,64		15 - 20	12,60
	20 - 30	11,00		20 - 30	10,70
	30 - 40	11,50		30 - 40	11,06
4 (P+AN)	0 - 5	15,00	9 (P+K+KS)	0 - 5	16,04
	5 - 10	13,33		5 - 10	14,08
	10 - 15	12,83		10 - 15	13,48
	15 - 20	12,66		15 - 20	12,71
	20 - 30	10,88		20 - 30	10,47
	30 - 40	10,80		30 - 40	11,17
5 (P+KS)	0 - 5	15,29			
	5 - 10	13,84			
	10 - 15	13,05			
	15 - 20	12,30			
	20 - 30	10,78			
	30 - 40	11,25			

sich vom zweiten zum vierten Abschnitt eine kontinuierliche Abnahme abzeichnete. Die P_2O_5 -Werte der Abschnitte 5 und 6 gleichen den Werten der Kontrollvariante 1. In Tabelle 50 wurden die Gesamt- P_2O_5 -Gehalte zusammengestellt.

Tabelle 50
Gesamt- P_2O_5 -Gehalte aller Bodensäulen
des neutralen Bodens Darmstadt

Variante	mg P_2O_5 /Säule	mg P_2O_5 /Säule aus Düngung
1	45,56	-
2	49,76	4,20
3	49,96	4,40
4	49,82	4,26
5	50,28	4,72
6	49,72	4,16
7	49,92	4,36
8	49,86	4,30
9	50,26	4,70

In den P-Varianten mit Calciumnitrat (5 und 9) wurden die Höchstmengen an P_2O_5 ermittelt. Die P-Varianten mit Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat zeigen etwas niedrigere Werte. Noch niedriger sind die P_2O_5 -Werte der P-Varianten ohne Stickstoff 2 und 6. Kaliumdüngung in den Varianten 6 - 9 beeinflusste die Verfügbarkeit der Phosphorsäure im Vergleich zu den Varianten 2 - 5 nicht.

b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse

1. In den P-Düngungsvarianten aller Böden wurden die höchsten P_2O_5 -Gehalte jeweils im obersten Abschnitt angetroffen.
2. Die Eindringtiefe der Phosphorsäure zeigte innerhalb der vier Versuchsböden gewisse Unterschiede, indem bei den beiden neutralen Böden die Phosphorsäure bis zu einer Tiefe von 20 cm nachgewiesen werden konnte. Auf den beiden sauren Böden dagegen blieb die P_2O_5 -Verlagerung auf die beiden obersten Abschnitte bei dem Lehm- und auf die drei obersten Abschnitte bei dem sauren Sandboden beschränkt.
3. Aufkalkung führte zu höheren Lactatwerten. Deshalb lagen die P_2O_5 -Werte bei dem aufgekalkten Obertshausen II höher als bei den ursprünglichen sauren Böden.
4. Von den verschiedenen N-Düngern hatte Calciumnitrat einen günstigen Einfluß auf die Verfügbarkeit der Dünger- P_2O_5 . Der Einfluß von Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat war vergleichsweise gering.
5. Kaliumdüngung hatte weder auf Verfügbarkeit der Dünger- P_2O_5 noch auf ihre Verlagerung einen Einfluß.

5. Verteilung bzw. Verlagerung des Kaliums

a. Ergebnisse und Diskussion

In den Tabellen 51, 53, 55 und 57 sind die für die Verteilung bzw. Verlagerung des Kaliums ermittelten K_2O -Werte enthalten. Auch hier sei bemerkt, daß in den K_2O -Gehalten gleicher Varianten bei den einzelnen Böden Unterschiede auftraten. Sie sind auf die unterschiedlichen Bodenmengen gleicher Abschnitte, auf die unterschiedliche Textur der Böden sowie auf ihren natürlichen K-Gehalt zurückzuführen.

Nach der Untersuchung der Böden wurde ganz allgemein folgendes festgestellt:

Eine Verlagerung des Dünger-Kaliums innerhalb der Bodensäulen erfolgt bei jedem Boden. Es konnte bis zum sechsten Abschnitt eindringen. Die Verteilung des Düngerkaliums innerhalb der Abschnitte aller Säulen war bei den einzelnen Böden unterschiedlich. Die Höchstmengen an K_2O wurden naturgemäß in Varianten mit Kaliumdüngung nachgewiesen. Bei den N-Varianten ohne Kaliumdüngung (3 - 5) wurden K_2O -Mengen ermittelt, die unter den K_2O -Mengen der nicht mit N gedüngten Varianten 1 und 2 liegen.

Bei dem Boden Lich (Tabelle 51) sind die geringeren K_2O -Gehalte in den Varianten ohne N-Düngung (1,2) ganz besonders in den Varianten mit N-Düngung (3 - 5) anzutreffen. Die K_2O -Gehalte in den Varianten 1 - 5 unterscheiden sich bis auf den obersten Abschnitt der N-Varianten (3 - 5) wenig.

Auf diesem Boden mit dem Höchstgehalt an bodeneigenem Kalium traten die niedrigsten Mengen an Düngerkalium auf. Die Varianten mit Kaliumdüngung (6 - 9) weisen die Höchstgehalte an K_2O auf und die Verteilung inner-

Tabelle 51

Verlagerung bzw. Verteilung des Kaliums

im Boden "Lich"

mg K_2O in 100 g Boden

Variante	Abschnitt cm	mg K_2O	Variante	Abschnitt cm	mg K_2O
1 (Kontr.)	0 - 5	10,68	6 (P+K)	0 - 5	22,51
	5 - 10	10,69		5 - 10	15,24
	10 - 15	11,23		10 - 15	14,02
	15 - 20	10,31		15 - 20	13,48
	20 - 30	11,55		20 - 30	11,55
	30 - 40	11,26		30 - 40	11,78
2 (P)	0 - 5	10,72	7 (P+K+AS)	0 - 5	19,52
	5 - 10	10,72		5 - 10	15,03
	10 - 15	11,24		10 - 15	11,53
	15 - 20	10,32		15 - 20	11,09
	20 - 30	11,51		20 - 30	11,76
	30 - 40	11,24		30 - 40	11,95
3 (P+AS)	0 - 5	7,33	8 (P+K+AN)	0 - 5	20,05
	5 - 10	10,12		5 - 10	14,56
	10 - 15	11,15		10 - 15	11,31
	15 - 20	14,00		15 - 20	12,07
	20 - 30	12,37		20 - 30	13,63
	30 - 40	12,53		30 - 40	11,31
4 (P+AN)	0 - 5	6,48	9 (P+K+KS)	0 - 5	22,61
	5 - 10	9,73		5 - 10	14,82
	10 - 15	10,91		10 - 15	12,55
	15 - 20	13,22		15 - 20	11,19
	20 - 30	11,52		20 - 30	11,41
	30 - 40	10,46		30 - 40	10,52
5 (P+KS)	0 - 5	9,69			
	5 - 10	10,05			
	10 - 15	11,03			
	15 - 20	11,75			
	20 - 30	11,33			
	30 - 40	10,41			

halb der Bodensäulen erfolgt ähnlich. Lediglich im obersten Abschnitt bestehen deutliche Unterschiede, wo der oberste Abschnitt der Varianten 7 und 8 also der Varianten, die mit Ammoniumstickstoff gedüngt worden sind, deutlich erniedrigte K_2O -Gehalte erkennen lassen. Diese Wirkung des Ammonium-N ist auch in den Varianten 3 und 4 zu erkennen, wo ebenfalls der Ammonium-N zu einer Verarmung des obersten Abschnittes an bodeneigenem Kalium geführt hat.

Die Höchstmengen an Kalium (Boden- und Dünger-K) wurden in den beiden obersten Abschnitten der Varianten 6 - 9 gefunden; im dritten Abschnitt war noch eine leichte Anreicherung gegenüber den vergleichbaren Varianten 2 - 5 zu erkennen. In den darunter liegenden Abschnitten war ein nennenswerter Einfluß der Kaliumdüngung nicht mehr zu erkennen.

In der Tabelle 52 sind die Gesamt- K_2O -Gehalte aller Bodensäulen wiedergegeben.

Tabelle 52
Gesamt- K_2O -Gehalte aller Bodensäulen
des Bodens Lich

Variante	mg K_2O /Säule	mg K_2O /Säule aus Düngung
1 (Kontr.)	35,27	-
2 (P)	35,28	-
3 (P+AS)	34,50	-
4 (P+AN)	34,82	-
5 (P+KS)	35,00	-
6 (P+K)	42,82	7,54
7 (P+K+AS)	42,28	7,78
8 (P+K+AN)	42,58	7,76
9 (P+K+KS)	42,73	7,73

Bei den Varianten mit Düngerkalium (6 - 9) kam es zu einer starken K_2O -Anreicherung des Bodens: 28 % des Düngerkaliums konnten nach Versuchsende nachgewiesen werden. Wie bereits erwähnt, gingen durch die Auswaschung etwa 26 % des Düngerkaliums verloren, so daß ein Defizit von etwa 45 % entsteht. Dieses Kalium muß im Boden verblieben sein, wurde aber mit DL-Methode nicht erfaßt.

Nun weist Boden Lich einen hohen Gehalt an Tonmineralien auf, Montmorillonit spielt dabei eine dominierende Rolle. Nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1960) ergibt sich für Montmorillonit folgende Eintauschstärke



So ist anzunehmen, daß ein Teil des zugeführten Kaliums durch Montmorillonit sorbiert bzw. fixiert worden ist. Es erhebt sich die Frage, in welchen Säulenabschnitten der Varianten 6 - 9 die Sorption bzw. Fixierung stattgefunden hat. Die Tatsache, daß erhebliche Mengen des Düngerkaliums zur Auswaschung gelangten, liegt die Vermutung nahe, daß das in der Bilanz nicht wieder gefundene Kalium mehr oder weniger gleichmäßig in allen Säulenabschnitten fixiert worden ist.

Wie Tabelle 53 zeigt, weist der Boden Obertshausen I nur etwa halb so hohen Gehalt an bodeneigenem Kalium wie der Boden Lich auf. In den Varianten ohne Kalium (1 - 6) schwanken zwischen den einzelnen Varianten in sämtlichen Säulenabschnitten die Kaliumgehalte innerhalb sehr geringen Grenzen. Ein Einfluß der Phosphatdüngung bzw. der Düngung mit P und N in drei verschiedenen N-Formen hat offensichtlich nicht zu einer Verlagerung des bodeneigenen Kaliums geführt.

Tabelle 53

Verlagerung bzw. Verteilung des Kaliums

im Boden "Obertshausen I"

mg K₂O in 100 g Boden

Variante	Abschnitt cm	mg K ₂ O	Variante	Abschnitt cm	mg K ₂ O
1	0 - 5	5,62	6	0 - 5	12,53
(Kontr.)	5 - 10	5,49	(P+K)	5 - 10	12,40
	10 - 15	5,47		10 - 15	12,00
	15 - 20	5,50		15 - 20	13,09
	20 - 30	5,62		20 - 30	5,85
	30 - 40	5,75		30 - 40	6,76
2	0 - 5	5,58	7	0 - 5	11,20
(P)	5 - 10	5,46	(P+K+AS)	5 - 10	11,94
	10 - 15	5,11		10 - 15	10,84
	15 - 20	5,33		15 - 20	10,32
	20 - 30	5,56		20 - 30	5,39
	30 - 40	5,50		30 - 40	6,40
3	0 - 5	5,52	8	0 - 5	11,98
(P+AS)	5 - 10	5,37	(P+K+AN)	5 - 10	12,27
	10 - 15	5,24		10 - 15	12,28
	15 - 20	5,32		15 - 20	12,87
	20 - 30	5,38		20 - 30	5,05
	30 - 40	5,40		30 - 40	6,39
4	0 - 5	5,60	9	0 - 5	13,05
(P+AN)	5 - 10	5,51	(P+K+KS)	5 - 10	13,42
	10 - 15	5,18		10 - 15	12,75
	15 - 20	5,34		15 - 20	12,26
	20 - 30	5,42		20 - 30	5,45
	30 - 40	5,45		30 - 40	6,65
5	0 - 5	5,55			
(P+KS)	5 - 10	5,41			
	10 - 15	5,34			
	15 - 20	5,55			
	20 - 30	5,50			
	30 - 40	5,50			

In den Varianten mit Kalium (6 - 9) zeichnet sich unter Einfluß des Düngerkaliums eine starke Zunahme der K_2O -Werte ab. In den vier obersten Abschnitten dieser Varianten ist eine relativ gleichmäßige Anreicherung eingetreten. Mit Ausnahme der Variante 7, wo wiederum die Düngung mit Ammoniumsulfat zu niedrigeren K_2O -Gehalten führte. Bei allen K-Varianten im fünften Abschnitt ist keine sichere Erhöhung der K_2O -Gehalte zu bemerken, im sechsten Abschnitt trat eine leichte Zunahme ein.

In der Tabelle 54 sind die Gesamt- K_2O -Mengen in den Säulen des Bodens Obertshausen I aufgeführt.

Tabelle 54
Gesamt- K_2O -Gehalte aller Bodensäulen
des sauren Bodens "Obertshausen I"

Variante	mg K_2O /Säule	mg K_2O /Säule aus Düngung
1	22,36	-
2	22,31	-
3	21,75	-
4	22,00	-
5	22,10	-
6	36,34	14,03
7	35,50	13,75
8	36,06	14,06
9	36,16	14,06

Aus der Tabelle 54 geht hervor, daß ziemlich genau 50 % des Düngerkaliums in lactatlöslicher Form in den K-Düngungsreihen wiedergefunden wurde. Unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Auswaschung des Düngerkaliums von 33 % ergibt sich auf diesem Boden,

daß etwa 17 % des Düngerkaliums im Boden fixiert worden sind. Auch hier kann angenommen werden, daß diese Menge gleichmäßig auf sämtliche Abschnitte der Bodensäulen verteilt ist.

Der Boden Obertshausen II (Tabelle 55) weist ähnliche Mengen an bodeneigenem Kalium auf wie der ursprüngliche Boden. Auch hier ist die Verteilung des Boden- K_2O innerhalb der einzelnen Säulen gleichmäßig. Lediglich in den mit Stickstoff gedüngten Varianten 3 - 5 ist eine gewisse Verarmung im obersten Abschnitt erkennbar. Das Verhalten des Dünger- K_2O ist durch die Aufkalkung beeinflusst worden. Die Höchstgehalte an K_2O werden jetzt im dritten und vierten Abschnitt gefunden, aber auch die ersten und zweiten Abschnitte lassen deutliche Anreicherung mit Kalium erkennen. Auch im fünften Abschnitt haben K_2O -Gehalte deutlich zugenommen, lediglich im untersten sechsten Abschnitt ähneln die Werte denen der entsprechenden nicht mit N gedüngten Varianten.

Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat in den Varianten 7 und 8 haben zu einer deutlichen Senkung der K_2O -Gehalte im obersten Abschnitt geführt.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß die Aufkalkung die Verlagerung des Dünger- K_2O innerhalb der Bodensäulen deutlich beeinflusst hat.

Tabelle 55

Verlagerung bzw. Verteilung des Kaliums
im Boden "Obertshausenaufgekalkt"

mg K ₂ O in 100 g Boden					
Variante	Abschnitt cm	mg K ₂ O	Variante	Abschnitt cm	mg K ₂ O
1 (Kontr.)	0 - 5	5,63	6 (p+K)	0 - 5	9,14
	5 - 10	5,61		5 - 10	8,82
	10 - 15	5,63		10 - 15	11,04
	15 - 20	5,69		15 - 20	12,06
	20 - 30	5,67		20 - 30	7,48
	30 - 40	5,62		30 - 40	5,54
2 (P)	0 - 5	5,63	7 (P+K+As)	0 - 5	7,85
	5 - 10	5,61		5 - 10	9,19
	10 - 15	5,63		10 - 15	9,90
	15 - 20	5,69		15 - 20	10,33
	20 - 30	5,69		20 - 30	7,32
	30 - 40	5,67		30 - 40	5,65
3 (P+As)	0 - 5	5,02	8 (P+K+As)	0 - 5	7,76
	5 - 10	5,19		5 - 10	9,19
	10 - 15	5,23		10 - 15	12,62
	15 - 20	6,42		15 - 20	12,71
	20 - 30	5,57		20 - 30	7,25
	30 - 40	5,71		30 - 40	5,30
4 (P+As)	0 - 5	5,01	9 (P+K+K ₂)	0 - 5	9,22
	5 - 10	5,30		5 - 10	9,38
	10 - 15	5,33		10 - 15	10,96
	15 - 20	6,37		15 - 20	14,33
	20 - 30	5,69		20 - 30	7,25
	30 - 40	5,80		30 - 40	5,51
5 (P+K ₂)	0 - 5	5,02			
	5 - 10	5,37			
	10 - 15	5,40			
	15 - 20	6,76			
	20 - 30	5,86			
	30 - 40	5,20			

In der Tabelle 56 wurden die Gesamt-K₂O-Gehalte aller Varianten zusammengestellt.

Tabelle 56
Gesamt-K₂O-Gehalte aller Bodensäulen
des Bodens Obertshausen II

Variante	mg K ₂ O/Säule	mg K ₂ O/Säule aus Düngung
1	23,11	-
2	23,18	-
3	22,55	-
4	22,70	-
5	22,97	-
6	34,62	11,44
7	34,08	11,53
8	34,44	11,74
9	34,48	11,51

Der in den Varianten 6 - 9 gefundene Anteil des Dünger-K₂O war niedriger als auf dem ursprünglichen Boden. Er betrug lediglich 41 %, demgegenüber betrug die Auswaschung etwa 45 %. Somit ergibt sich ein Fehlbetrag von etwa 14 %, der als fixiert angesehen werden muß.

Der Boden Darmstadt (Tabelle 57) enthält den niedrigsten Gehalt an bodeneigenem Kalium.

In den Varianten 1 - 5 (ohne Kaliumdüngung) bestehen nur geringfügige Unterschiede sowohl zwischen den verschiedenen Abschnitten der einzelnen Bodensäulen als auch zwischen den verschiedenen Bodensäulen selbst. P- und N-Düngung führten nicht zu einer Verlagerung des bodeneigenen Kaliums. In den K-Düngungsvarianten 6 - 9 ist der K₂O-Gehalt sämtlicher Säulenabschnitte durch die Kaliumdüngung erhöht worden. Die stärksten Erhöhungen sind in den Abschnitten 2 - 4 zu verzeichnen. Geringer war die Abnahme des K₂O-Gehaltes in den Abschnitten 5 und 6.

Tabelle 57

Verlagerung bzw. Verteilung des Kaliums

im Boden "Darmstadtneutral"

mg K₂O in 100 g Boden

Variante	Abschnitt cm	mg K ₂ O	Variante	Abschnitt cm	mg K ₂ O
1 (Kontr.)	0 - 5	2,39	6 (P+K)	0 - 5	5,70
	5 - 10	2,40		5 - 10	7,80
	10 - 15	2,37		10 - 15	7,80
	15 - 20	2,33		15 - 20	7,96
	20 - 30	2,46		20 - 30	4,03
	30 - 40	2,32		30 - 40	3,94
2 (P)	0 - 5	2,34	7 (P+K+AS)	0 - 5	5,30
	5 - 10	2,40		5 - 10	6,64
	10 - 15	2,37		10 - 15	7,36
	15 - 20	2,33		15 - 20	6,05
	20 - 30	2,40		20 - 30	4,08
	30 - 40	2,40		30 - 40	4,08
5 (P+AS)	0 - 5	2,22	8 (P+K+Alf)	0 - 5	5,16
	5 - 10	2,14		5 - 10	6,83
	10 - 15	2,26		10 - 15	7,90
	15 - 20	2,28		15 - 20	7,80
	20 - 30	2,33		20 - 30	4,38
	30 - 40	2,37		30 - 40	4,34
4 (P+Alf)	0 - 5	2,12	3 (P+K+KS)	0 - 5	5,85
	5 - 10	2,35		5 - 10	7,74
	10 - 15	2,30		10 - 15	7,90
	15 - 20	2,26		15 - 20	6,56
	20 - 30	2,28		20 - 30	4,36
	30 - 40	2,20		30 - 40	4,40
5 (P+KS)	0 - 5	2,20			
	5 - 10	2,35			
	10 - 15	2,36			
	15 - 20	2,44			
	20 - 30	2,34			
	30 - 40	2,36			

Eine Wirkung der N-Düngung war wiederum in den mit Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat gedüngten Varianten (7 und 8) zu erkennen, wo die beiden obersten Abschnitte die niedrigsten K_2O -Gehalte aufwiesen.

Der Boden Darmstadt weist insgesamt die stärkste Verlagerung des Düngerkaliums auf. Das muß einmal auf den natürlichen Kalkgehalt, zum anderen auf seinen niedrigen Tongehalt zurückgeführt werden.

In der Tabelle 58 sind die ermittelten Gesamt- K_2O -Werte aufgeführt.

Tabelle 58
Gesamt- K_2O -Gehalte aller Varianten
des Bodens Darmstadtneutral

Variante	mg K_2O /Säule	mg K_2O /Säule aus Düngung
1	9,59	-
2	9,63	-
3	9,32	-
4	9,43	-
5	9,53	-
6	23,16	13,53
7	22,50	13,18
8	22,85	13,42
9	23,00	13,47

Vom Düngerkalium konnten durchschnittlich etwa 48 % in den Säulen wiedergefunden werden. Die Auswaschung betrug etwa 38 %, d.h. daß 86 % des Düngerkaliums erfaßt wurden, während wiederum etwa 14 % der Fixierung unterlegen sein müssen.

b. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse:

1. Die vier Versuchsböden hatten unterschiedliche Gehalte an bodeneigenem Kalium. Eine Verlagerung dieses Kaliums innerhalb der Bodensäulen durch die Beregnung, aber auch durch P- und N-Düngung konnte nicht festgestellt werden, bis auf gelegentliche geringfügige Verarmung des obersten Säulenabschnitts nach Düngung mit Ammoniumsulfat.
2. Die Verlagerung des Düngerkaliums erwies sich als abhängig von der Bodenart und der Bodenreaktion: Auf dem chlorreichen sauren Boden Lich war die geringste Verlagerung festzustellen, auf CaCO_3 -haltigem Sandboden Darmstadt war sie am ausgeprägtesten. Der Einfluß einer Aufkalkung am Beispiel des Bodens Obertshausen ist deutlich.
3. Der Einfluß der Stickstoffdüngemittel auf die Verlagerung des Kaliums war insgesamt gering. Ammoniumhaltige N-Düngemittel führten zu einer leichten Verarmung des obersten bzw. der beiden obersten Abschnitte an Düngerkalium.
4. Bei der Aufstellung einer K_2O -Bilanz unter Berücksichtigung der Kaliauswaschung wurde auf keinem der vier Versuchsböden das Düngerkalium vollständig erfaßt. Das Defizit war bei den einzelnen Böden unterschiedlich; am höchsten beim Boden Lich, am niedrigsten beim Boden Darmstadt und dem aufgekalkten Boden Obertshausen II. Es wird angenommen, daß das nicht von der DL-Methode erfaßte Kalium fixiert wurde.

D. ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION

Mit den beschriebenen Versuchen wurden die Auswaschung und Verlagerung bzw. Verteilung des Stickstoffs als $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$, des Kaliums und der Phosphorsäure untersucht. Die vorliegenden Versuchsergebnisse wurden an Bodensäulen ermittelt. Die gegebene Versuchsanstellung weicht naturgemäß von praktischen Verhältnissen ab, weil die Bodensäulen während der gesamten Versuchsdauer stets die volle Wasserkapazität aufwiesen. Trotzdem können solche Laborversuche für die Praxis wichtige Hinweise geben.

Wie die Einzelergebnisse zeigten, erfolgte die Stickstoffauswaschung fast ausschließlich als Nitrat. $\text{NH}_4\text{-N}$ wurde nur in geringen Mengen ausgewaschen. Dies stimmt mit den von PFAFF (1963), VÖMEL (1963), BOGUSLAWSKI und ATANASIU (1964) gemachten Beobachtungen überein.

Zu Beginn des Versuches wurden ziemlich große $\text{NO}_3\text{-N}$ -Mengen ausgewaschen. Die Höchstmengen wurden in den ersten drei Dekaden ermittelt. Dazu ist folgendes zu sagen: Alle vier Versuchsböden wurden vor Versuchsbeginn gesiebt und aufgewahrt. Es kann vermutet werden, daß bei der Trocknung eine Nitrifikation stattgefunden hat. Die Berechnungsmenge betrug 130 mm bzw. 100 ml je Säule und je Dekade, d.h. insgesamt 650 mm. Unmittelbar vor Beginn der Beregnung wurden die Säulen auf die volle Wasserkapazität gebracht, Dann wurden Düngemittel in löslicher Form zugeführt. Die zur vollen Sättigung vor Versuchsbeginn notwendige Wassermenge war bei den einzelnen Böden je nach Textur verschieden. Sie war aber geringer als die in den ersten Dekaden zugeführte Menge des Beregnungswassers, so daß bereits am Ende der ersten Dekade Regenwasser und leicht lösliche Nährstoffe aus der Düngung im Sickerwasser erscheinen konnten. Diese Umstände führten bereits in der ersten

Dekade zur Auswaschung erheblicher Nitratmengen auf allen Böden.

In der dritten und vierten Dekade nehmen die Nitrat-Verluste ab, da mit fortschreitender Beregnung eine zunehmende Verarmung an Nitratstickstoff in den Böden eintrat. In der letzten Dekade war meistens ein erneuter leichter Anstieg der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Auswaschung zu verzeichnen. Diese Zunahme ist damit zu erklären, daß der ursprüngliche Boden eine gewisse Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ enthielt. Mit zunehmender Beregnungsdauer und damit durch Förderung der Nitrifikationsbedingungen wurde vorhandenes Ammonium in Nitrat überführt, das dann ausgewaschen werden konnte.

Zur Auswaschung des Nitrat-N ist weiterhin zu sagen, daß Stickstoff aus allen Düngemitteln in Form von Nitratstickstoff ausgewaschen wurde und zwar weniger aus den $\text{NH}_4\text{-N}$ -haltigen, mehr aus den salpeterhaltigen Düngemitteln (siehe Abb. 1). Bekanntlich muß Ammoniumstickstoff erst durch Bakterien nitrifiziert werden, um dann ausgewaschen werden zu können. Jedoch verläuft die Nitrifikation auf den einzelnen Böden, insbesondere in Abhängigkeit von der Bodenreaktion unterschiedlich schnell. So kommt es z.B., daß auf dem aufgekalkten Boden Obertshausen in den Varianten mit Ammoniumsulfat-Düngung bereits nach der ersten Dekade wesentlich größere Mengen $\text{NO}_3\text{-N}$, der offensichtlich aus der Düngung stammt, ausgewaschen werden als auf den ursprünglichen sauren Boden. In der folgenden Tabelle 59 sind für die Düngungsvarianten die Auswaschungswerte an $\text{NO}_3\text{-N}$ in % der Düngung aufgeführt:

Tabelle 59

NO₃-N-Auswaschung in % der N-Düngung

	Var.3 AS	Var.4 AN	Var. 5 KS	Var.7 AS	Var.8 AN	Var.9 KS
Lich	27,5	44,6	78,0	26,4	44,6	78,1
Obertsh. I	28,9	50,5	89,4	29,3	50,6	88,8
Obertsh.II	34,0	62,2	100,6	34,3	62,3	100,1
Darmstadt	31,1	59,7	94,0	31,5	59,8	94,3

Aus den Ergebnissen geht hervor, daß die verschiedenen N-Formen, obwohl in gleichen Mengen verabreicht, auf verschiedenen Böden in unterschiedlichen Prozentsätzen ausgewaschen wurden. Dies zeigt einen bedeutsamen Einfluß der Bodenreaktion auf die Nitrifikation und damit auf die Nitrat Auswaschung.

Von den 300 kg/ha Stickstoff, die in Varianten 3 und 7 lediglich in Form von Ammoniumsulfat (NH₄-N), in Varianten 4 und 8 je zur Hälfte als NH₄-N und NO₃-N und in den Varianten 5 und 9 nur als NO₃-N gedüngt wurden, gelangten die Höchstmengen an NO₃-N in den Varianten 5 und 9 zur Auswaschung gefolgt von den NO₃-N-Mengen der Variante 4 und 8. Die geringsten Mengen an NO₃-N wurden in den mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten (3 und 7) nachgewiesen.

Die Ermittlung des Nitratstickstoffs in den Abschnitten der einzelnen Bodensäulen ergab unterschiedliche Gehalte. Hier wurden in den mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten größere Mengen an NO₃-N ermittelt als in den nur mit Nitrat (KS) gedüngten Säulen. Offenbar handelt es sich hier zum Teil um Nitratstickstoff, der während der Beregnung in den oberen Abschnitten der Bodensäulen nitrifiziert wurde, aber nicht mehr zur Auswaschung gelangte und zum Teil um NO₃-N, der nach dem Auseinandernehmen der Bodensäulen und beim Trocknen der Böden durch Nitrifikation entstanden ist.

Von dem bodeneigenen Stickstoff wurden geringe Mengen verlagert, während der Dünger-N je nach N-Form zwar unterschiedliche aber stets höhere Werte an $\text{NO}_3\text{-N}$ aufwies. Im Boden Lich wurden die Höchstmengen an $\text{NO}_3\text{-N}$ in den mit Ammoniumnitrat gedüngten Varianten nachgewiesen, bei den übrigen drei Sandböden dagegen in den mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten. Diese Erscheinung dürfte darauf zurückzuführen sein, daß in den Sandböden eine viel stärkere Nitrifikation stattgefunden hat als in dem schweren Boden Lich. Es wurden auf allen Böden die geringsten Nitratmengen in den mit Calciumnitrat gedüngten Varianten und zwar stets in den untersten Abschnitten ermittelt. Hohe Mengen an $\text{NO}_3\text{-N}$ zeigten sich bei der Auswaschung und geringe Mengen an $\text{NO}_3\text{-N}$ bei der Verlagerung, eine Erscheinung, die in den mit Calciumnitrat gedüngten Varianten immer wieder vorkommt. Dies stimmt mit den von KOHNLEIN und KNAUER (1958), GLIEMEROTH (1959), PFAFF (1963) erzielten Ergebnissen überein. Kaliumdüngung verstärkte in einigen Fällen die Verlagerung des Nitrats, während Phosphatdüngung darauf keinen Einfluß hatte.

Die Auswaschung von Ammonium-N fällt nicht ins Gewicht, wenn sie mit $\text{NO}_3\text{-N}$ -Auswaschung verglichen wird. Sie erfolgte mehr aus dem Boden $\text{NH}_4\text{-N}$ als aus dem Dünger- $\text{NH}_4\text{-N}$. Der Anteil der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Auswaschung an dem Dünger-Ammonium-N macht im Durchschnitt aller Böden 1 % der Düngung aus, wenn kleine Schwankungen unberücksichtigt bleiben. Außerdem wurde naturgemäß Ammonium nur aus den mit $\text{NH}_4\text{-N}$ gedüngten Varianten 3 und 7 (A3) bzw. 4 und 8 (A8) ausgewaschen.

Bei allen Böden sind hinsichtlich der Ammonium-Auswaschung graduelle Unterschiede festzustellen. Auf den beiden Böden Obertshausen sind etwas höhere Boden- und Dünger- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen ausgewaschen als bei den Böden Lich und Darmstadt. Bei den letztgenannten Böden sind etwa gleiche Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ ausgewaschen worden,

obwohl der Boden Lich im Vergleich zu dem Boden Darmstadt einen sehr hohen Gehalt an Boden-N aufzuweisen hat. Der hohe Tonanteil dieses Bodens hielt die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Auswaschung gering.

Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Auswaschung war in der ersten Dekade bei allen Böden stets etwas höher als in den weiteren Dekaden. Dies ist, wie eingangs bereits erwähnt, darauf zurückzuführen, daß im Sickerwasser der ersten Dekade mit dem Beregnungswasser auch leichtlösliche Nährstoffe und darunter Ammoniumstickstoff ausgewaschen werden konnte. Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Verluste sind insgesamt gesehen zu gering, um die N-Bilanz wesentlich beeinflussen zu können.

Die nach Abschluß der Sickerwasserversuche durchgeführten Bodenuntersuchungen brachten Unterschiede in der Verlagerung des Ammonium-N. In der Tabelle 60 sind die aus ammoniumhaltigen Düngemitteln stammende Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ aufgeführt, die nach Versuchsende in den entsprechenden Bodensäulen anzutreffen waren. In den Varianten mit Calciumnitrat-Düngung wurde kein aus der Düngung stammender $\text{NH}_4\text{-N}$ -Stickstoff gefunden.

In der Tabelle 60 ist der ausgewaschene Anteil des Dünger- $\text{NH}_4\text{-N}$ in % der gesamten N-Düngung angegeben.

Tabelle 60
Der ausgewaschene Anteil des Dünger- $\text{NH}_4\text{-N}$
in % der gesamten N-Düngung

	VR. 3 AS	VR. 4 AN	VR. 7 AS	VR. 8 AN
Lich	34,3	19,0	36,3	18,9
Obertshausen I	40,5	26,6	39,3	26,4
ObertshausenII	30,4	13,6	29,6	14,2
Darmstadt	36,4	16,6	36,2	16,2

Aus den Ergebnissen der Tabelle 60 geht folgendes Bild hervor: Es wird deutlich, daß sich sowohl in den mit Ammoniumsulfat gedüngten als auch in den mit Ammoniumnitrat gedüngten Varianten ein Teil der Ammonium-Dünger-N in den Bodensäulen wieder nachweisen läßt. Erwartungsgemäß sind die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte der mit Ammoniumsulfat gedüngten Varianten (3 und 7) größer als diejenigen der mit Ammoniumnitrat gedüngten Varianten (4 und 8).

Die Menge des im Boden verbliebenen $\text{NH}_4\text{-N}$ ist jedoch nicht allein von der Höhe der Nitrifikation abhängig, sondern ebenfalls von der Fixierung des $\text{NH}_4\text{-N}$. Das wird bei Aufstellung einer N-Bilanz deutlich; hierbei zeigt sich nämlich bei dem Boden Lich, daß in den mit Ammonium gedüngten Varianten ein Teil des Dünger- $\text{NH}_4\text{-N}$ und zwar 7 % bei den Varianten mit Ammoniumnitrat und 14 % bei den Varianten mit Ammoniumsulfat.

Bei den drei übrigen Sandböden ist die N-Bilanz vollständiger, weil hier eine sehr geringe $\text{NH}_4\text{-Sorption}$ stattgefunden hat.

In der Tabelle 61 sind die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Auswaschungswerte in % der Düngung wiedergegeben.

Tabelle 61

Die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Auswaschung in % der Düngung
bei den mit $\text{NH}_4\text{-Düngern}$ gedüngten Varianten

	VR.3 AS	VR.4 AN	VR.7 AS	VR.8 AN
Obersthausen I	29,9	50,5	29,3	50,6
Obertshausen II	34,0	62,2	34,2	62,3
Darmstadt	31,1	59,7	31,5	59,8

Ein Vergleich zwischen in den Bodensäulen ermittelten $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen mit $\text{NO}_3\text{-N}$ -Auswaschungsmengen (Tabelle 61) zeigt, daß die Nitrifikation am stärksten auf dem aufgekalkten Boden Obertshausen II war, gefolgt von dem

CaCO_3 -haltigen Boden Darmstadt. Auf dem sauren Boden Obertshausen I verläuft sie verhältnismäßig langsamer.

Die Bodenuntersuchungen der einzelnen Bodensäulenabschnitte führten ferner zu dem Ergebnis, daß auf allen Böden die Höchstgehalte an $\text{NH}_4\text{-N}$ in den obersten vier Abschnitten also bis zu einer Tiefe von 20 cm nachgewiesen wurden. Ob wesentliche Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ tiefer als 20 cm eingedrungen sind, ist nicht mit Sicherheit zu entscheiden. Wäre dies der Fall gewesen, so hätte zumindest eine geringe Menge von $\text{NH}_4\text{-N}$ in den unteren Abschnitten gefunden werden müssen.

In den Abbildungen 1 und 2 wurde die Darstellung einer Gesamt-N-Bilanz ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4\text{-N}$) versucht, indem die bei der Auswaschung gefundenen Werte für NH_4^- und $\text{NO}_3\text{-N}$ sowie in den Säulen gefundenen Mengen dargestellt.

Die unterhalb der O-Linie gelegenen schraffierten Felder geben den Anteil des bodeneigenen Stickstoffs im Sickerwasser an, während die nicht schraffierten Felder den aus der Düngung stammenden Anteil kennzeichnen. Ebenso stellen die oberhalb der O-Linie gelegenen mit Kreuzen markierten Felder den bodeneigenen Stickstoff dar, während die nicht schraffierten Flächen den Dünger-N in den Bodensäulen wiedergeben.

Bei dem Boden Lich fallen die hohen N-Mengen im ungedüngten Boden auf; diese sind im Boden Darmstadt am niedrigsten. Auf der anderen Seite sind die auf den nicht mit N gedüngten Varianten eingetretenen Auswaschungsverluste auf dem Boden Lich am geringsten, und auf den sandigen Böden am höchsten. Auf dem ungedüngten Boden Lich geht durch die Auswaschung etwa ein Viertel des ursprünglichen N-Vorrates verloren, auf dem Boden Obertshausen etwa ein Drittel und auf dem Boden Darmstadt mehr als die Hälfte.

Abbildung 1 zeigt nochmals sehr anschaulich das Verhalten des Stickstoffs in den drei miteinander verglichenen Stickstoffdüngemittel: Geringe Tendenz des Ammoniumsulfats zur Auswaschung, demgegenüber die völlige Auswaschung des Stickstoffs aus dem Calciumnitrat. Weiterhin wird noch einmal deutlich, daß überall ein, wenn auch geringer, Einfluß der Kaliumdüngung auf die Nitrat Auswaschung besteht.

Abbildung 2 zeigt sehr anschaulicherweise, daß die Auswaschung an $\text{NH}_4\text{-N}$ nur einen Bruchteil der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Auswaschung ausmacht und praktisch zu vernachlässigen ist. Auf der anderen Seite wird deutlich, daß auch nach 650 mm Niederschlägen noch erhebliche Mengen an Ammonium aber auch an Nitratstickstoff im Boden zurückbleiben. Das gilt besonders für die ammoniumhaltigen Düngemitteln.

Abb. 1 Stickstoff-Bilanz ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$)

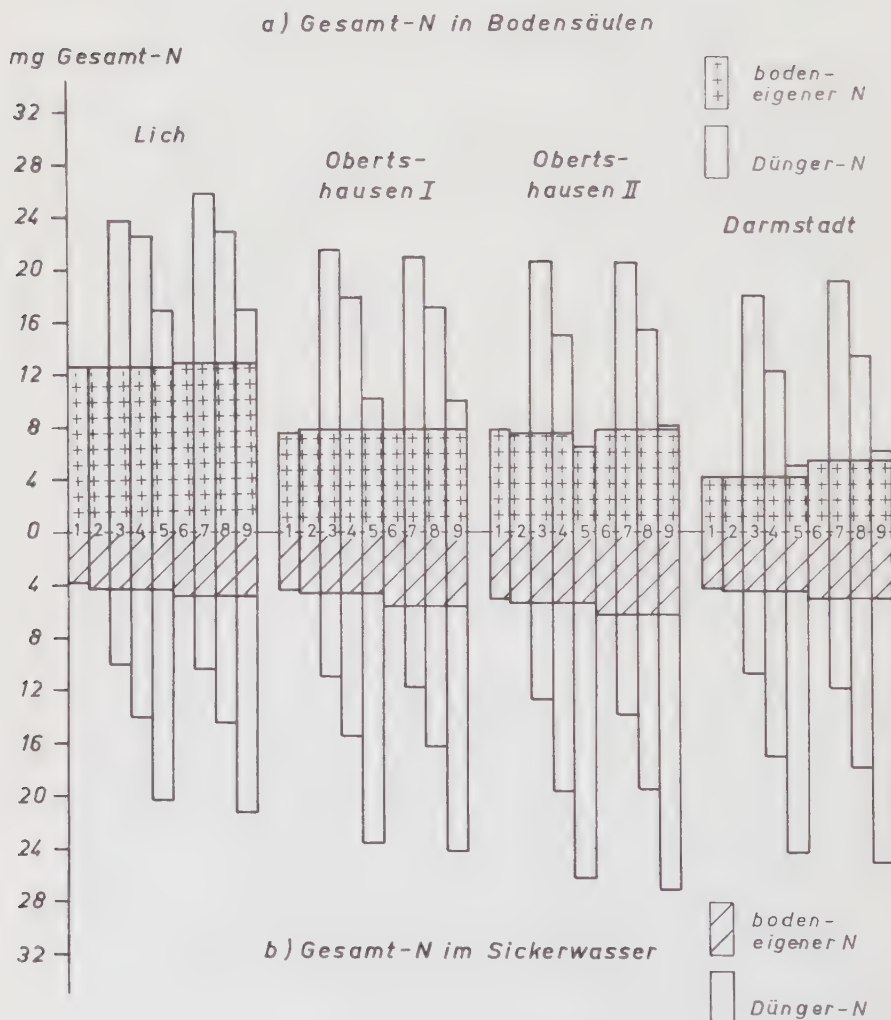
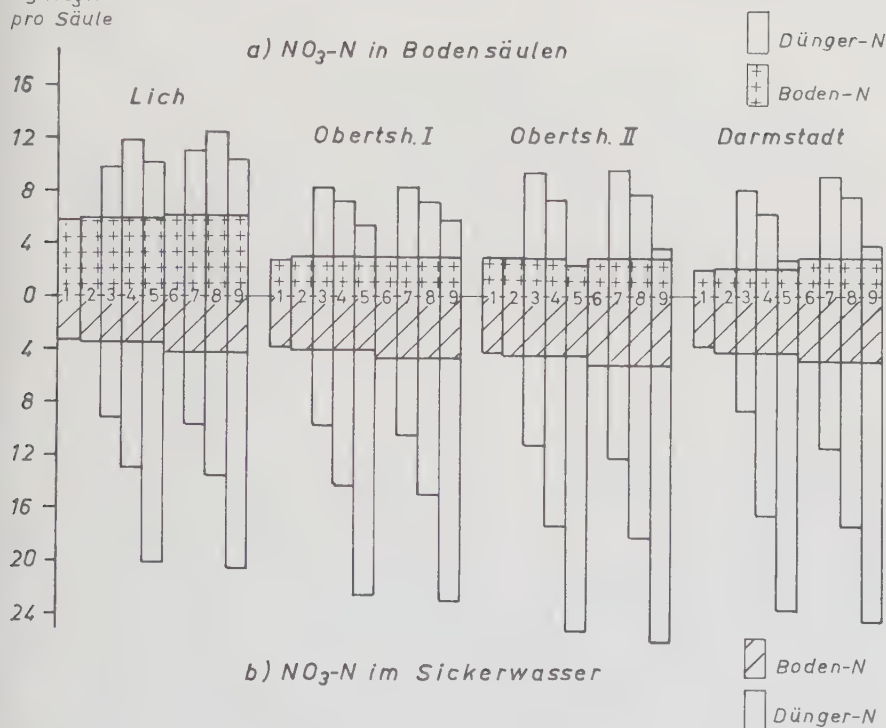


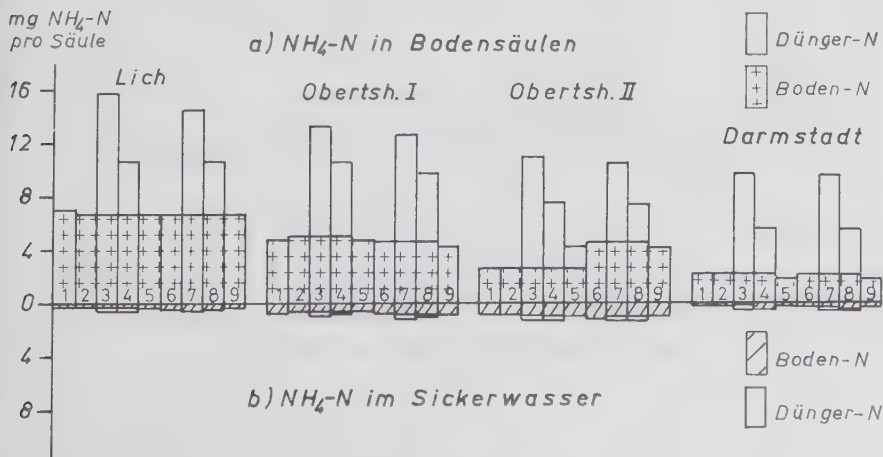
Abb. 2 Bilanz für $\text{NO}_3\text{-N}$

mg $\text{NO}_3\text{-N}$
pro Säule



Bilanz für $\text{NH}_4\text{-N}$

mg $\text{NH}_4\text{-N}$
pro Säule



Mit der Tabelle 62 wurde eine N-Bilanz in % des Dünger-N aufgestellt.

Tabelle 62
N-Bilanz (NH_4 - + NO_3 -N) in % des Dünger-N

	VR.3 AS	VR.4 AN	VR.5 KS	VR.7 AS	VR.8 AN	VR.9 AS
Lich	86,0	93,0	99,0	87,0	94,0	98,0
Obertsh. I	95,0	98,0	100,0	95,0	98,0	100,0
Obertsh. II	97,0	99,0	97,0	98,0	100,0	96,0
Darmstadt	99,0	100,0	98,0	98,0	101,0	98,0

Die N-Werte zeigen, daß ein Teil des Dünger-N nicht wieder erfaßt werden konnte. Der Fehlbetrag ist in den mit AS gedüngten Varianten des Bodens Lich mit 14 % am höchsten. Die geringsten N-Verluste finden sich z.T. auf den mit KS gedüngten und z.T. auf den mit AN gedüngten Varianten. Die N-Verluste können entweder durch Fixierung des Ammoniums im Boden selbst oder aber durch Denitrifikation - also Rückführung des Stickstoffs in die Atmosphäre - entstanden sein. Z.T. liegen die gefundenen Werte auch innerhalb des Analysenfehlers.

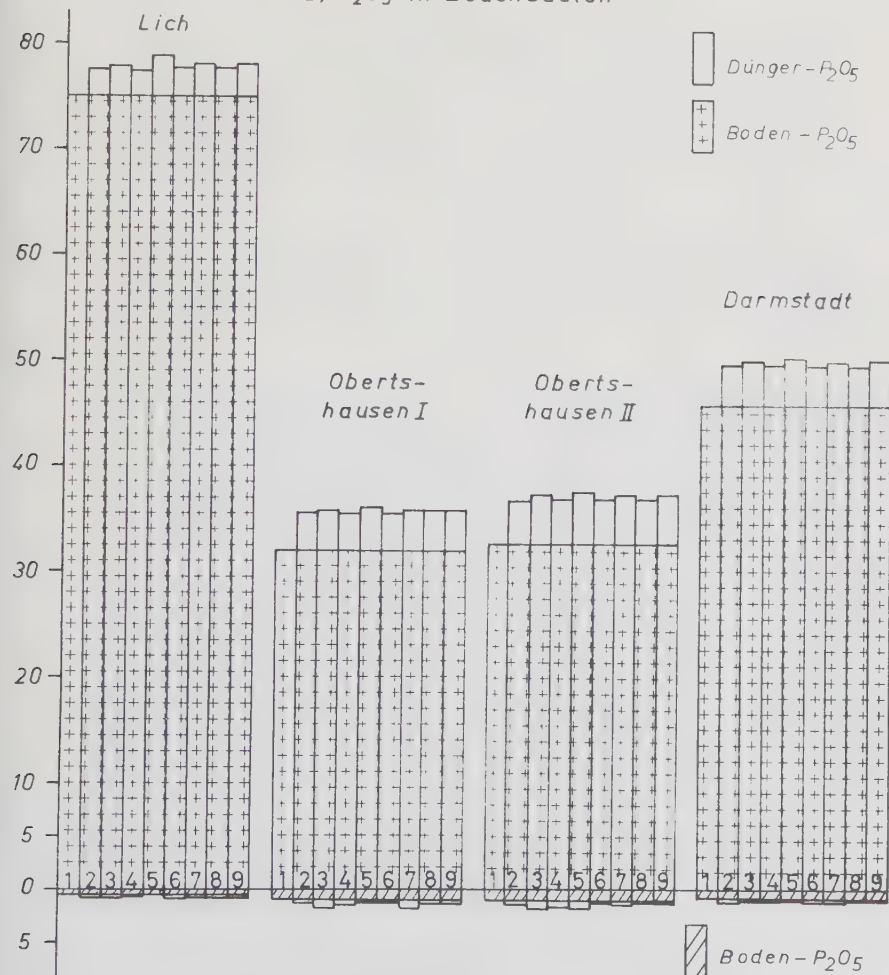
Phosphorsäure wurde in geringen Mengen ausgewaschen, die für die Praxis ohne Bedeutung sind. Diese Ergebnisse stimmen mit den von SCHARRE und KÜHN (1958), KÖHNLEIN und KNAUER (1958), SÜSS und PFAFF (1963) und OEHRING und KNAUER (1966) gemachten Beobachtungen überein. Die drei Sandböden weisen etwas höhere P_2O_5 -Auswaschung auf als der Boden Lich, erwartungsgemäß hatte der Boden Lich trotz der Höchstmengen an bodeneigenem P_2O_5 niedrigere P_2O_5 -Werte aufzuweisen, den sein Tongehalt vor einer Phosphorsäureauswaschung schützt.

Abbildung 3 stellt die P-Bilanz aller vier Böden dar. Auf allen Böden übersteigen die Mengen an Boden- P_2O_5

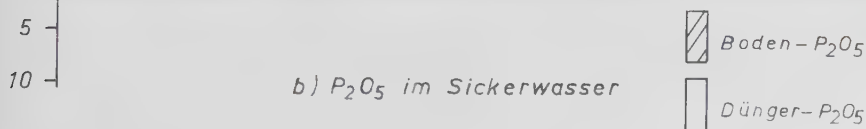
Abb.3 Bilanz von Phosphorsäure

mg P_2O_5
pro Säule

a) P_2O_5 in Bodensäulen



b) P_2O_5 im Sickerwasser



die der erfaßten Dünger- P_2O_5 bei weitem. Es wurde bereits hingewiesen, daß durch die Beregnung eine Verlagerung der Boden- P_2O_5 innerhalb der Bodensäulen kaum eingetreten ist, während eine Verlagerung der Dünger- P_2O_5 bis zu einem gewissen Grade stattgefunden hat, und zwar drang die Dünger- P_2O_5 auf den beiden neutralen Böden etwas tiefer ein (bis zu 20 cm) als auf den beiden sauren Böden (bis zu 10 cm) was auf dem neutralen Boden als Zunahme der P_2O_5 -Verfügbarkeit angesehen werden kann. Ähnliche Beobachtungen haben SCHARRE und KÜHN (1955) gemacht.

Die Tabelle 63 zeigt an, welcher Anteil der Dünger- P_2O_5 im Sickerwasser (SW) und bei der DL-Extraktion wiedergefunden wurde:

Tabelle 63

Anteil von SW- und Dünger- P_2O_5 in % der Düngung

	VR.2 P	VR.3 P+AS	VR.4 P+AN	VR.5 P+KS	VR.6 P+K	VR.7 N+P+K	VR.8 N+P+K	VR.9 N+P+K
Lich	18,0	19,0	19,0	20,0	18,0	19,0	19,0	20,0
Obertsh. I	25,0	27,0	26,0	28,0	25,0	27,0	27,0	28,0
Obertsh. II	29,0	31,0	30,0	33,0	29,0	31,0	30,0	33,0
Darmstadt	30,0	32,0	31,0	34,0	30,0	32,0	31,0	34,0

Wie aus Tabelle 63 zu entnehmen ist, wurden durch die Extraktion mit Doppellactat kaum mehr als 30 % der Dünger- P_2O_5 erfaßt.

Die geringsten Mengen an Dünger-P wurden innerhalb der Varianten des Bodens Lich nachgewiesen. Bei diesem Boden konnten insgesamt etwa 19 % des Dünger-P erfaßt werden. Somit ergibt sich ein Defizit von 81 %. Bei dem Boden Obertshausen konnten insgesamt 27 % an Dünger-P ermittelt werden, wobei ein Fehlbetrag von etwa 73 % entsteht. Die beiden neutralen Böden lieferten etwas höhere Werte an P_2O_5 und zwar 31 % bei Obertshausen II; 32 % bei dem Boden Darmstadt, so daß noch 69 % der Dünger-P mit DL-Methode nicht erfaßt wurden. Der Boden

Lich fixierte die Dünger-P auf Grund seines hohen Tongehaltes am stärksten. Die Verfügbarkeit des Dünger-P war auf beiden neutralen Böden größer und untereinander etwa gleich.

Kalkung bzw. Calciumnitratdüngung bewirkten bei Boden Obertshausen bzw. in den betreffenden Varianten eine Erhöhung der P_2O_5 -Werte. Diese Beobachtung machten auch CHANG und JACKSON (1958) und KAILA (1961).

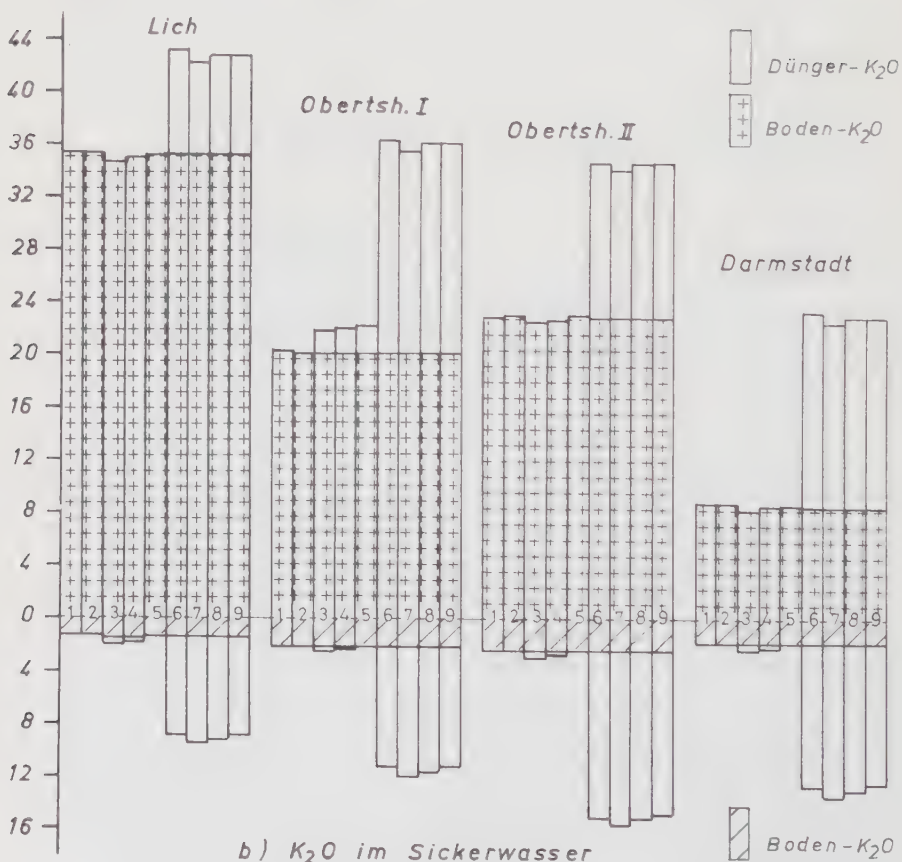
Für Kalium ergab sich eine höhere Auswaschung als in der Literatur angegeben. Die Versuche bei der vorliegenden Arbeit wurden jedoch bei einer Bodenschicht von nur 40 cm ohne Pflanzenbewuchs und mit einer Düngergabe von 400 kg K_2O /ha durchgeführt. Diese Umstände führten dazu, daß die K_2O -Verluste höher liegen als normalerweise angegeben. Hinzu kommt, daß bei der vorliegenden Versuchsanstellung Wasserverluste durch Evaporation kaum auftreten konnten. Bei Ackerkrumenslysometern von KÖHNLEIN und KNAUER (1958) traten ebenfalls ähnlich hohe K_2O -Verluste ein.

Die K_2O -Verluste auf Sandboden waren besonders auf dem alkalischen Boden höher als auf dem Lehm Boden Lich, wie dies aus der Abbildung 4 für die K-Bilanz hervorgeht. Der hohe Anteil des Bodens Lich an Sorptionsträgern schützte Düngerkalium vor einer höheren Auswaschung. Die Anwesenheit von Ammonium in der Düngung verstärkte die Auswaschung sowohl des Bodens- als auch des Düngerkaliums. Dieser Einfluß wurde ebenfalls bei den Kaliumgehalten der Bodensäulen zu Ausdruck gebracht. Die Untersuchungen verschiedener Verfasser wie ALLISON, 1953; NÜMMIK, 1957; JOUNG, 1964 zeigten, daß NH_4^+ und K^+ um die gleichen Plätze am Sorptionskomplex konkurrieren, so daß durch Austauschvorgänge K^+ bzw. NH_4^+ ausgetauscht werden.

Abb. 4 Kalium - Bilanz

mg K_2O
pro Säule

a) K_2O in Bodensäulen



b) K_2O im Sickerwasser

Die Aufkalkung des sauren Bodens Obertshausen I verstärkte die Auswaschung des Kaliums, was ebenfalls auf einen Kationenaustausch zurückgeführt werden muß.

Dieser Befund steht im Einklang mit den von KÖHNLEIN und Mitarbeiter (1966) gemachten Beobachtungen. Bei den Untersuchungen von PFAFF (1963) trat eine solche Wirkung der Aufkalkung nicht ein.

Die K_2O -Bilanz (Tabelle 64) ergibt unterschiedliche Werte für den Boden einerseits und die drei Sandböden andererseits.

Tabelle 64

K-BILANZ in % des Dünger- K_2O

	VR.6	VR.7	VR.8	VR.9
Lich	58,0	61,0	59,0	59,0
Obertshausen I	83,0	84,0	84,0	83,0
Obertshausen II	86,0	88,0	88,0	86,0
Darmstadt	86,0	88,0	87,0	86,0

Der geringste Anteil des Düngerkaliums bei den Varianten des Bodens Lich. Ebenfalls war die K_2O -Auswaschung auf diesen Böden am niedrigsten von allen vier Versuchsböden.

Es wurde bereits erwähnt, daß der Boden Lich einen hohen Tongehalt besitzt, wobei Montmorillonit eine dominierende Rolle spielt. SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1960) wiesen eine starke K-Fixierung durch Montmorillonit nach. So muß für den Boden Lich angenommen werden, daß etwa 40 % des Dünger-K fixiert wurden, während die Fixierung von den übrigen Böden zwischen 17 bis 12 % betrug .

Die höheren Werte gelten für den sauren Boden Obertshausen I. Auf dem aufgekalkten Boden Obertshausen II war die Fixierung deutlich niedriger und ähnlich der des Bodens Darmstadt.

Die Dünger- K_2O Gehalte der Böden Obertshausen II und Darmstadt ähneln einander. Saurer Boden Obertshausen I hat jedoch höhere K_2O -Werte, da aus diesem Boden weniger K_2O -Verluste nachgewiesen wurden als bei den beiden neutralen Böden. Die Bilanzaufstellung (Tabelle 64) zeigt, daß bei den beiden neutralen Böden gleiche Mengen 14 % fehlen, bei dem sauren Obertshausen I etwas mehr und zwar etwa 17 % an K_2O , die im Boden verblieben bzw. fixiert werden müssen.

E. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurden Auswaschungsversuche mit 4 Versuchsböden durchgeführt, und zwar mit einem sauren Lehm Boden, einem sauren Sandboden, einem aufgekalkten- und einem kalkhaltigen Sandboden. Nach Versuchsende wurden die Bodensäulen in einzelne Abschnitte zerlegt und darin mit verschiedenen Methoden Gehalt an NO_3^- und $\text{NH}_4\text{-N}$, P_2O_5 und K_2O bestimmt.

Die Versuchsanstellung erlaubte es, Aussagen zu machen sowohl über die Auswaschung der genannten Nährstoffe, als auch über ihre Verlagerung in den Bodensäulen. Die Untersuchungen erstreckten sich besonders auf das Verhalten verschiedener N-Düngemittel, die in Kombination mit P und PK verabreicht wurden, und zwar in Mengen, wie sie hohen Gaben in der praktischen Landwirtschaft entsprechen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse sowohl im Hinblick auf Auswaschung als auch Verlagerung ist zu berücksichtigen, daß es sich um Modellversuche handelt, bei denen der Wasserverbrauch durch die Pflanzen fehlte bzw. die Evaporation nicht wirksam war. In einer 50-tägigen Berechnungsperiode wurden insgesamt 650 mm H_2O , was den durchschnittlichen Niederschlagsmengen Westdeutschlands entspricht, zugeführt.

A. Die Untersuchungen des Sickerwassers führten zu folgenden Ergebnissen:

1. Auswaschung von Nitrat-N

1. Aus allen Böden wurden nicht bedeutende Mengen an bodeneigenem Stickstoff ausgewaschen.
2. Der größte Teil der Auswaschungsverluste an $\text{NO}_3\text{-N}$ trat bereits in den ersten 3 Dekaden ein.
3. Calciumnitrat ergab die höchsten Auswaschungsverluste an $\text{NO}_3\text{-N}$, aber auch Ammoniumsulfat führte

nach vorausgegangener Nitrifikation zu bedeutenden NO_3 -N-Verlusten. Eine mittlere Stellung nahm Ammoniumnitrat ein.

4. Die Aufkalkung des sauren Bodens Obertshausen I bewirkte bei den ammoniumhaltenen Düngemitteln eine verstärkte NO_3 -N-Auswaschung, die auf einer Förderung der Nitrifikation beruhen dürfte.
5. Eine Kaliumdüngung hatte sowohl in den mit Stickstoff gedüngten Varianten als auch in den Varianten ohne N eine erhöhte NO_3 -N-Auswaschung zur Folge.

II. Auswaschung von Ammonium-N

1. Auf allen Böden und bei allen Düngungsvarianten wurden sehr geringe Mengen an NH_4 -N ausgewaschen, die im Vergleich zur NO_3 -N-Auswaschung nicht ins Gewicht fallen und die in der Größenordnung der P-Auswaschung liegen.
2. Die höchsten Mengen an NH_4 -N wurden stets aus den mit schwefelsaurem Ammoniak gedüngten Varianten ausgewaschen, gefolgt von denen mit Ammoniumnitrat gedüngten.
3. Die Erhöhung des pH-Wertes des sauren Sandbodens Obertshausen I hatte eine leicht erhöhte NH_4 -N-Auswaschung zur Folge.
4. Bei den ammoniumhaltigen Düngemitteln führte eine gleichzeitige Kaliumdüngung zu einer leichtverstärkten NH_4 -N-Auswaschung.

III. Auswaschung von Phosphat

1. Im Sickerwasser aller Böden und Düngungsvarianten konnten geringe Mengen nachgewiesen werden. Die Sandböden zeigten geringfügig höhere Werte als ein Lehm Boden.
2. Die P-Düngung hatte nur eine unwesentliche Zunahme der P_2O_5 -Auswaschung bewirkt.

3. Aufkalkung beeinflusste geringfügig den zeitlichen Verlauf der P_2O_5 -Auswaschung.
4. N-Düngung in verschiedener Form und ebenfalls die K-Düngung hatten keinen Einfluß auf die Höhe der P_2O_5 -Auswaschung.

IV. Auswaschung von Kalium

1. Trotz der relativ niedrigen Gehalte der Böden an lactatlöslichen Kalium waren die Auswaschungsverluste an bodeneigenem Kalium noch.
 2. Bei gleichzeitiger Düngung mit Ammoniumsulfat, aber auch mit Ammoniumnitrat, nahmen die K_2O -Verluste zu.
 3. Von Dünger-K wurden auf dem Sandboden wesentlich höhere K_2O -Mengen ausgewaschen als auf dem Lehm-boden.
 4. Die Aufkalkung eines sauren Bodens hatte weitere Zunahme der K_2O -Auswaschung zur Folge.
3. Die Untersuchung der Bodensäulen auf ihren Gehalt an NO_3-N , NH_4-N , P_2O_5 und K_2O ergab folgende Befunde hinsichtlich der Verteilung bzw. Verlagerung der einzelnen Nährstoffe:

I. Verteilung bzw.

Verlagerung des Nitrat-N

1. Eine Verlagerung von bodeneigenem NO_3-N trat kaum ein, d.h. in den nicht mit N gedüngten Varianten war Nitrat in allen Abschnitten mehr oder weniger gleichmäßig verteilt.
2. Die N-Düngung dagegen führte zu einer unterschiedlichen Verteilung des Nitrat-N.
3. Schwefelsaures Ammoniak bewirkte eine Erhöhung des Nitrat-N-Gehaltes hauptsächlich in den oberen Abschnitten, Ammoniumnitrat dagegen in den unteren Ab-

schnitten. Vom Calciumnitrat wurden nur noch geringe Mengen Nitrat-N in den Bodensäulen ermittelt, vorwiegend in den untersten Abschnitten.

4. Kalkung bzw. ein natürlicher Kalkgehalt wirkten sich verstärkend auf eine $\text{NO}_3\text{-N}$ Verlagerung nach unten aus.

II. Verteilung bzw.

Verlagerung des Ammonium-N

1. Eine Verlagerung des bodeneigenen $\text{NH}_4\text{-N}$ nach unten durch eine Beregnung trat nicht ein. Vielmehr deutete sich eine leichte Verarmung der unteren Abschnitte an $\text{NH}_4\text{-N}$ an.
2. $\text{NH}_4\text{-N}$ aus der Düngung, sei es als Ammoniumsulfat oder Ammoniumnitrat verabreicht, war lediglich bis zu einer Tiefe von 20 cm nachzuweisen, wobei die höchsten Gehalte in den oberen Bodenschichten auftraten.
3. Die Aufkalkung des sauren Bodens hatte eine deutliche Abnahme der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte in den oberen Schichten zur Folge.
4. Während die P-Düngung die Verteilung des Ammoniums-N nicht beeinflusste, sind bei K-Düngung leicht erniedrigte $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte zu beobachten, sehr wahrscheinlich als Folge des Kationenaustausches.

III. Verteilung bzw.

Verlagerung der Phosphorsäure

1. Auf sämtlichen Böden wurde der größte Teil der Dünger- P_2O_5 jeweils im obersten Abschnitt nachgewiesen.
2. Die Eindringtiefe der Dünger- P_2O_5 ergab bei den 4 Versuchsböden gewisse Unterschiede, indem bei den neutralen Böden die Phosphorsäure bis zu einer Tiefe

von 20 cm eindringen konnte. Dagegen blieb die P_2O_5 -Verlagerung bei den beiden sauren Böden auf die obersten 10 cm beschränkt.

3. Die Aufkalkung führte zu einer besseren P_2O_5 -Verfügbarkeit bzw. zu höheren Lactatwerten.
4. Die Düngung mit Calciumnitrat wirkte sich günstig auf die Verfügbarkeit der Dünger- P_2O_5 aus.
5. Bei der Aufstellung einer P_2O_5 -Bilanz unter Berücksichtigung der P_2O_5 -Auswaschung wurde ein hoher Prozentsatz der Dünger- P_2O_5 nicht erfaßt. Das Defizit war bei dem sauren Lehm Boden am größten, d.h., daß hier die Festlegung der Dünger- P_2O_5 am stärksten war.

IV. Verteilung bzw.

Verlagerung des Kaliums

1. Die Verlagerung des bodeneigenen Kaliums war gering.
2. Die Verlagerung des Düngerkaliums war abhängig von der Bodenart und der Bodenreaktion; auf dem sauren Lehm Boden Lich trat sie weniger in Erscheinung als auf dem kalkhaltigen Sandboden.
3. Von den N-Düngemitteln förderten die ammoniumhaltigen Düngemittel die Verlagerung des Kaliums nach unten mit gleichzeitiger Verarmung der oberen Bodenschichten an Düngerkalium.
4. Wie bei Phosphat ergab auch die Kaliumbilanz ein Defizit, das am größten auf dem sauren Lehm Boden, am geringsten auf dem kalkhaltigen Sandboden war.

Aus den Ergebnissen kann man folgendes schließen:

Von den untersuchten Nährstoffen unterliegt besonders der Nitrat-N einer starken Auswaschung. Bei der Bemessung der Düngung mit Nitratdünger sollte diesem Sachverhalt durch geteilte Gaben und Berücksichtigung des Vegetationsverlaufes Rechnung getragen werden.

Die Auswaschung des Ammoniak-N war erwartungsgemäß viel geringer als die des Nitrat-N, und liegt etwa in der Größenordnung der P-Auswaschung. Dagegen erreicht die Auswaschung des Kaliums einen mittleren Wert, dessen Höhe bei der Kaliversorgung der Pflanzen besonders auf leichten Böden zu beachten ist.

Die Ergebnisse der Untersuchung der einzelnen Bodenschichten im Hinblick auf die Verlagerung der Nährstoffe bestätigte, die in den Auswaschungszahlen gewonnenen Daten. Nitrat zeigte die größte Beweglichkeit und konnte in den Bodensäulen kaum noch nachgewiesen werden.

Ammonium-N wurde nur in den obersten 20 cm verlagert, Phosphat noch weniger. Kalium nimmt auch bei der Verlagerung eine mittlere Stellung ein.

In allen Versuchen trat der Einfluß der Bodenart und des pH-Wertes deutlich in Erscheinung. Außerdem ließen sich gegenseitige Beeinflussungen der einzelnen Nährstoffe bei ihrer Auswaschung und Verlagerung beobachten.

F. LITERATURVERZEICHNIS

=====

- ADAMS, R. S., jr. und STEVENSON, F. J.: Sorption und Freisetzung von Ammonium bei Gesteinen und Mineralen. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 108, 255, 1965.
- ALLISON, F. B., KEFAUVER, F. und ROLLER, E. M.: Soil, Sci., Soc. Proc. 17, 107, 1953.
- ATANASIU, N.: Zur Frage der Ausnutzung des Bodenstickstoffs durch die Pflanze. Stikstof 12, 17 - 21, 1968.
- BALKS, R. und REEKERS, I.: Bestimmung des Nitrat- und Ammoniakstickstoffs im Boden. Landw. Forschung, band III, 13, 1955/56.
- BARSCHAD, I.: Cation exchange and its relations to potassium fixation and the determination of ammonium exchange capacity. Soil Sci. 72, 361 - 371, 1951.
- BATES, Th. L. und TISDALE, S. L.: The movement of nitrate nitrogen through columns of coarse-textured soil materials. Proc. Soil. Sci. Soc. America. 21, 525 - 528, 1957.
- BATJER, D. und KUNTZE, H.: Untersuchungen des Niederschlagswassers im Küstengebiet Ostfrieslands und Oldenburgs. Die Küste. 11, 34 - 51, 1963.
- BAUMANN, H. und MAAß, G.: Über den Verlauf des Nitratgehaltes unter verschiedenen Fruchten in Ackerboden. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 72, 125, 1957.
- BLUME, H. P., FÜNNICH, K. O. und ZIMMERMANN, U.: Untersuchungen der lateralen Wasserbewegung in ungesättigten Böden. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 121, 231 - 245, 1968.
- BOGUSLAWSKI, B. v. und ATANASIU, N.: Kleinlysimeterversuche mit ¹⁵N. Bericht an die Forschungsgemeinschaft. Institut f. Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Unveröffentlicht, Gießen 1964.
- BOWER, C. A.: Fixation of ammonium in difficulty exchangeable form under moist conditions by same soils of semiarid regions. Soil sci. 70, 375 - 382, 1950.

- BROWN, J. und BARTHOLOMEW, W. V.: Soil Sci. Soc. Amer. proc. 26, 195, 1962.
- BURRICHTER, C.: Beiträge zur Beurteilung von Böden auf Grund Fluoreszenzmikroskopischer Untersuchung ihrer Mikroflora. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 63, 154 - 171, 1953.
- CHUNG, . und JACKSON, .: Soil phosphorus fractions in some representative soils.
- DÖRING, H.: Untersuchungen über die Ausnutzbarkeit der Phosphorsäure. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde, 73, 235 - 245, 1956.
- EHRENBERG, P. und BUCHNER, A.: Ergänzende Versuche über Anwendung von Rophosphaten auf sauren Böden. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 51, 246, 1950.
- FAST, H.: Untersuchungen über die dem Boden durch die Niederschläge zugeführten Pflanzennährstoffe und deren Auswaschung durch Sickerwasser. Dissertation Gießen 1951.
- FREDERICK, L. und DUMENIL, L.: Agriculture Ammonia News. 6, Nr. 4, 56, 1956.
- GERICKE, S. und KURMIES, B.: Pflanzennährstoffe in den atmosphärischen Niederschlägen. Die Phosphorsäure. 17, 279 - 299, 1957.
- GERLACH, M.: Untersuchungen über die Menge und Zusammensetzung der Sickerwässer. Landw. Jahrb. 64, 701 - 733, 1926.
- GISIGER, L.: Die Wanderung der Düngerphosphorsäure in Wiesenböden. Die Phosphorsäure. 3, 462, 1933.
- GLIMEROTH, G.: Stickstoffverlagerung über Winter auf einem Lösslehm in Abhängigkeit von Form, Menge, Termin und Verteilung der Herbstdüngung. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 85, 20 - 31, 1959 a.
- GLIMEROTH, G.: Stickstoffverlagerung über Winter in Abhängigkeit von der Wasserführung eines Lehmbodens. Z. f. Acker- und Pflanzenbau. 127, 129, 1959 b.
- HEINAMANN, G. G.: Der Einfluß von Düngung, pH-Wert und Wasserhaushalt auf die P-Verteilung in Böden. Dissertation Hannover 1962.

- HERBST, W.: Radiophosphor als Hilfsmittel zur Bestimmung der Auswaschung von Bodenphosphorsäure durch Niederschläge. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 59, 139 - 144, 1951.
- HETTEREDICH, C.W.G.: Z. Bodenk. u. Pflanzenernähr., 2 (47), 189.
Zit. u. Scharrer, K. und Kühn, H., Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 56, 140 - 161, 1950.
- HOFMANN, Ed.: Die Bedeutung der Phosphorsäure beim Rotteprozeß, ihre Festlegung und Lösung durch biologische Faktoren. Die Phosphorsäure. 18, 1/2, 1958.
- HOFMANN, Ed. und TEICHER, K.: Über die verschiedenen Formen der Phosphorsäure in den Böden von lang-jährigen Felddüngungsversuchen. Die Phosphorsäure. 24, 319 - 355, 1964.
- HULPOI, H., DAKESIAN, S. und SLAIDE, Ch.: Methode zur Bestimmung der Nitrifikationsfähigkeit des Bodens in natürlicher Beschaffenheit. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 113, 45 - 52, 1960.
- HUPPERT, V. und BUCHNER, A.: Neue Versuchsergebnisse über die Wirkung der N-Formen unter besonderer Berücksichtigung der Umweltverhältnisse. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 66, 62 - 91, 1957.
- JACOB, A. und WIEGAND, K.: Umsetzungen des mineralischen Stickstoffs. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde, 52, 48 - 60, 1952.
- JANSSON, S. I.: Orientierende Studien über den Stickstoffkreislauf im Boden mit Hilfe von ^{15}N als Leitsotop. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 69, 190, 1955.
- JUNG, J. und DRESESEL, J.: Das Verhalten von Kalium. Z. Acker- und Pflanzenbau. 130, 43 - 43, 1959.
- KAILA, J.: Fertilizer phosphorus in some Finnish soils. J. Scient Agr. Soc. Finland. 33, 131 - 139, 1961.
- KAPPA, H.: Die Bodenelastizität. 300 - 326, J. Springer, Berlin 1929.
- KARIN, A. und LELAND, A.: A Study of ion-exchange properties of soil. Soil Sci. 22, 433 - 436, 1956.

- KLAUB, D.: Zur Kenntnis der Bodenmikroorganismen und ihrer Tätigkeit zu verschiedener Jahreszeit und bei verschiedener Bodenreaktion. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 21/22, 365 - 407.
- KÖHNLEIN, J. und KNAUER, N.: Wasser und Nährstoffbewegung aus der Ackerkrume in den Unterboden. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 81, 1 - 23, 1958.
- KÖHNLEIN, J. und KNAUER, N.: Ergebnisse der Kieler Dauerdüngungsversuche mit Phosphat und Kali. Schriftenreihe der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Kiel. Verlag Paul Parey 1963.
- KRETSCHMAR, R.: Untersuchungen über die Verlagerung von Ammonium-, Nitrat-, Chlorid- und Sulfationen im Boden der Niederterrasse des Rheins bei Bonn und ihr Abwandern in tiefere Bodenschichten. Dissertation Bonn 1964.
- LAMPE, S.: Vegetationsversuche zur Strohdüngung unter besonderer Berücksichtigung einer Chlorpikrinbehandlung des Bodens und der N-Auswaschung aus unbewachsenen und bewachsenen Lysimetern. Dissertation. Bonn 1962.
- LARSEN, J. E. und KOEHNKE, H.: Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 11, 378, 1946.
- LINSER, H., MOYR, H. und UNZETIG, H.: Untersuchungen über die Wanderung von Ionen in Bodensäulen. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 86, 57, 1959.
- LINSER, H.: Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung. II/1, Springer-Verlag, Wien-New York 1966.
- MAAB, G.: Untersuchungen über den Einfluß von Ammoniak und Nitratdünger auf den Gehalt an mineralischen Stickstoff im Boden. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 93, 26 - 38, 1961.
- MACHOLD, O.: Über die Bindungsform des "labilen" Phosphats im Boden. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 103, 132 - 138, 1963.
- MAC INTIVE, W. H., WINTERBERG, S. H., CLEMENTS, L. B. und STERGES, A. J.: Phosphate migration in limonstone and dolomited soils as registered by plant response. Soil Sci. Amer. 12, 1947.

- MC DOVELL, und
SMITH, S. G.: Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 22, 38, 1958.
- MATSON, S.,
WILLIAMS, E. G.,
ERIKSON, E. und
VAHTRAS, K.: Boden-, Bodenlösungsgleichgewichte und Phosphatlöslichkeit. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 50, 51 - 53, 1950.
- MICHAEL, G.,
DÖRING, H. und
BLUM, B.: Über den Bindungszustand der Phosphorsäure. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 61, 118, 1953.
- MITRA, S. P. und
SCHANKER, H.: Studien über die Wirkung verschiedener Phosphate auf N-Haushalt alkalischer Böden. Die Phosphorsäure. 17, 10, 1957.
- NÖMMIK, H.: Fixation and defixation of ammonium in soils. Acta Agric. Scandinavica. 7, 395 - 436, 1957.
- OTTERMANN, A. und
KRZYSCH, G.: Der Gehalt der Niederschläge in Dahlem an N, P, Ca, K und SO₄-Schwefel. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 111, 122 - 141, 1965.
- OWSCIA, I. und
WILBERG, E.: Die Wirkung einer 30-jährigen Mineral- und Stallmistdüngung auf den P₂O₅-Bindungszustand. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 113, 159 - 169, 1966.
- OZANNE, P. G.: The Loss of phosphorus from sandy soils. Austral. J. Agric. Res. 12, 409 - 423, 1961.
- PAGEL, H.: Bodenkunde 2, 2. Auflage. Gutenberg Buchdruckerei und Verlagsanstalt, Leipzig 1967.
- PFAFF, C.: Lysimeter-Versuche. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde, 48, 93, 1949.
- PFAFF, C.: Das Verhalten des Stickstoffs im Boden nach langjährigen Lysimeterversuchen. Z. Acker- und Pflanzenbau. 117, 77 - 79, 1963 a.
- PFAFF, C.: Das Verhalten der Phosphorsäure und der Alkalien im Boden nach langjährigen Lysimeterversuchen. 117, 100, 1963 b.
- RATHSACK, K.: Die Ammoniak- und Nitrat-Bildung aus Kalkstickstoff in Abhängigkeit von der Düngungskonzentration. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 11, 237 - 253, 1939.
- RIBLE, J. M. und
DAVIS, L. E.: Ion exchange in soil columns. Soil sci. 79, 41 - 47, 1955.

- RID, H. und SÜSS, A.: Die Verteilung von ^{32}P im Boden und dessen Aufnahme durch Sommergerste bei verschiedener Bodenbearbeitung. Landwirtschaftliche Forschung. 11, 40, 1958.
- RIEHM, H.: Arbeitsvorschrift zur Bestimmung der Phosphorsäure und des Kaliums nach dem Lactatverfahren. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 40 (85), 152 - 156, 1948.
- RIEHM, H. und QUELLMALZ, E.: Die Bestimmung der Pflanzennährstoffe im Regenwasser und in der Luft und ihre Bedeutung für die Landwirtschaft. Staatl. Landw. Versuchs- und Forschungsanstalt. Festschr. 171 - 183, 1959.
- SALLINGER, H. und HWANG, Y.: Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Stickstoffumsetzungen und Aziditätsänderungen in humosem Boden. Z. Bodenkunde und Pflanzenernährung 11, 1, 1938.
- SEKERA, F.: Z. Bodenkunde und Pflanzenernährung. 6, 288, 1938.
- SOMMER, G.: Untersuchungen zur Fraktionierung des anorganischen Phosphats im Boden. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 113, 215 - 226, 1966.
- SOUKUP, J.: Sorption und Auswaschung von Nährstoffionen aus Ionenaustauschern. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 120, 167 - 174, 1968.
- SÜSS, A.: Untersuchungen über die Wanderung von Nährstoffen in verschiedenen Böden. Z. Acker- und Pflanzenbau. 114, 157, 1962.
- SCHARRER, K.: Biologischer Kreislauf der Elemente im Boden. Studienbogen B/1, Verlag Lutzenmeyer, München 1946.
- SCHARRER, K.: Untersuchungen über die dem Boden zugeführten Pflanzennährstoffe. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 55, 97, 1951.
- SCHARRER, K.: und KUHN, H.: Sickerversuche zur Ermittlung der Auswaschung und Tiefenwirkung verschiedener Phosphorsäuredüngemittel allein und bei Anwesenheit von Stalldünger. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde. 58, 146 - 162, 1952.

- SCHEFFER, F.,
KLOKE, A. und
HEMPLE, K.: Z. Pflanzenernähr., Düng., Boden-
kunde. 91, 240 - 252, 1960.
- SCIMITT, L.: Besteht bei der Herbstdüngung die
Gefahr der Auswaschung von Dünger-
phosphorsäure?
Das Superphosphat. 5, 103, 1933.
- TEPE, W. und
DARLOWSKY, A.: Der Widerstand der Wasserbewegung
im Boden.
Z. Pflanzenernähr., Düng., Boden-
kunde. 122, 206 - 219, 1969.
- TORSTENSSON, G.: Zur Nitrifikation schwedischer
Ackerböden.
Z. Bodenkunde und Pflanzenernährung,
29, 162, 1943.
- ULRICH, B. und
HEMPLE, K.: Zur Umwandlungsdynamik der Phosphate
im Boden.
Z. Pflanzenernähr., Düng., Boden-
kunde. 97, 144, 1962.
- VÖMEL, A.: Der Versuch einer Nährstoffbilanz
am Beispiel verschiedener Kysimeter-
böden.
Z. Acker-, und Pflanzenbau. 123,
155 - 188, 1966.
- WIECHMANN, H.: Phosphor-Verteilung in Böden bei
Düngung mit Superphosphat und
Thomasphosphat.
115, 114 - 123, 1966.
- WILHELMIG, A.: Ursachen und Wirkung des Thomas-
mehls.
Die Phosphorsäure. 2, 257, 1932.
- YOUNG, J. L. und
MC NEAL, B. L.: Soil Sci. soc. Amer. Proc.
28, 334, 1964 a.
- YOUNG, J. L.: Soil Sci. Soc. Amer. Proc.
28, 339, 1964 b.
- ZEZSCHWITZ, E. v.: Zur Frage der Festlegung von P_2O_5
im Boden.
die Phosphorsäure. 13, 117 - 144,
1953.
- ZÖTTL, W.: Stikstof. 12, 8 - 16, 1968.

Für die Überlassung des Themas und die Förderung,
die mir bei der Durchführung der Arbeit zuteil wurde,
bedanke ich mich bei Herrn Professor Dr. H. Linser.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. H. Kühn,
der mich bei der Durchführung der Arbeit mit zahl-
reichen Anregungen und stetigem Interesse unterstützt
und betreut hat.

Mein Dank gilt ferner Herrn Professor Dr. W. Höfner
und den Institutsangehörigen für die stetige Hilfs-
bereitschaft.

Außerdem danke ich dem Kultusministerium der türkischen
Regierung für die Finanzierung meiner Arbeit.

Lebenslauf

Am 29. 8. 1941 wurde ich, Metin T a m c i, als Sohn des Unteroffiziers Cemil Tamci und seiner Ehefrau Fatma, geb. Gündogar in Seferihisar/Izmir geboren.

Nach dem Besuch der Volks-, Mittelschule und Namik-Kemal-Gymnasiums in Izmir legte ich 1961 die Reifeprüfung ab. Zum Wintersemester 1961 immatrikulierte ich mich an der Landwirtschaftlichen Fakultät der Ege-Universität in Izmir.

Während der Semesterferien absolvierte ich mein Praktikum in einem landwirtschaftlichen Privatbetrieb in Dagobertshausen/Krs. Marburg. Im Sommersemester 1965 legte ich in Izmir mein Diplomexamen mit Prädikat "gut" ab.

Bis 1966 arbeitete ich als Diplomlandwirt bei dem Forschungsinstitut in Menemen/Izmir. 1966 erhielt ich vom Kultusministerium der türkischen Regierung nach einer Ausleseprüfung Staatsstipendium und kam nach Deutschland.

Während eines 8monatigen Besuchs der Goethe-Institute in Boppard/R., Iserlohn und Brillon erweiterte ich meine Deutschkenntnisse und legte beim Prüfungsamt des Hessischen Kultusministers eine Übersetzerprüfung ab.

Juni 1969 heiratete ich die Lehrerin Charlotte Schmidt. Im September 1970 wurde unsere Tochter Deniz geboren.

Seit 1967 bin ich im Institut für Pflanzenernährung der Justus Liebig-Universität Gießen bei Herrn Prof. Dr. H. Linser mit der Durchführung der vorliegenden Arbeit beschäftigt.

Sehr geehrte Damen und Herren,

ich habe Ihr Schreiben vom 15.10.2014 erhalten und danke Sie für die Mitteilung.

Die Angelegenheit ist mir bekannt und ich werde mich darum kümmern.

Ich werde Sie in der nächsten Zeit über den Fortschritt informieren.

Mit freundlichen Grüßen,

[Name]

